

# 등가선형 및 비선형 납-고무받침 모델을 이용한 면진된 원전구조물의 지진응답의 비교

## Comparison of Seismic Responses of Seismically Isolated NPP Containment Structures using Equivalent Linear- and Nonlinear-Lead-Rubber Bearing Modeling

이진희<sup>1)</sup> · 송종걸<sup>1)\*</sup>

Lee, Jin Hi<sup>1)</sup> · Song, Jong-Keol<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>강원대학교 토목공학과

<sup>1)</sup>Department of Civil Engineering, Kangwon National University

### / ABSTRACT /

In order to perform a soil-isolation-structure interaction analysis of seismically isolated nuclear power plant (NPP) structures, the nonlinear behavior of a seismic isolation system may be converted to an equivalent linear model used in frequency domain analysis. Seismic responses for seismically isolated NPP containment structures subjected to a simple artificial acceleration history and different site class earthquakes are evaluated for the equivalent-linear and nonlinear models that have been applied to lead-rubber bearing (LRB) modeling. It can be observed that the maximum displacements of the equivalent linear model are larger than that of the nonlinear model. From the floor response spectrum analysis for the top of NPP containment structures, it can be observed that the spectral acceleration of an equivalent linear model at about 0.5 Hz frequency is about 2~3 times larger than that of a nonlinear model.

**Key words:** Equivalent linear model, nonlinear model, seismic isolation, lead-rubber bearing, nuclear power plant

### 1. 서 론

최근 국내에서 발생하는 지진의 빈도수가 점점 증가하는 추세이다. 이에 따라 주변국의 지진발생에 따른 피해현황에 관심이 많아지고 있다. 중국 쓰촨성에서는 2013년에 발생한 지진으로 많은 인명피해가 발생하였고, 일본 후쿠시마 앞바다에서 2011년에 발생한 지진해일에 의하여 많은 인명피해와 함께 도시의 주요 구조물을 및 공공시설을 파괴하였다. 특히 이로 인하여 후쿠시마 원전에 방사능이 누출되는 대형 재해가 발생하였다. 이러한 사건들 이후에 지진에 대한 중요구조물의 안전성 확보가 국가적인 관심사로 크게 대두되고 있는 실정이다. 특히 원전구조물과 같은 국가 주요기반 시설물

이 파괴될 경우, 전력공급에 차질을 빚을 뿐만 아니라 방사능의 유출로 인한 인명피해 및 환경파괴를 가져올 수 있기 때문에 원전 구조물에 대한 지진 안전성 확보의 중요성은 무엇보다 우선되어야 한다고 할 수 있다. 강진지역 국가에 국내고유모델의 원전을 수출하기 위해 필요한 내진성능을 단기간에 향상시킬 수 있는 방법으로 현재 활발히 연구되는 있는 방안이 원전에 면진을 적용하는 것이다. 원전구조물은 일반적으로 지진응답에 대한 지반의 영향을 무시할 수 없으므로 지반-구조물 상호작용해석을 고려하여 설계를 하기 때문에, 면진된 원전구조물 또한 지반-면진장치-구조물 상호작용해석을 적용하여 설계하여야 한다. 통상적인 지반-구조물 상호작용해석은 주로 진동수영역해석에 의해 수행되므로 선형적인 거동만 반영할 수 있다. 면진장치는 지진하중에 의해 비선형 거동을 하게 되는데 이를 지반-면진장치-구조물 상호작용해석을 진동수영역해석에서 수행하기 위해서는 면진장치의 비선형성을 등가선형모델로 치환하여 반영하여야 한다. 비선형 특성을 가진 면진장치를 등가선형모델로 전환할 경우에 대한 정확성을 평가하기

\*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: song@kangwon.ac.kr

(Received 28 April 2014; Revised 30 June 2014; Accepted 14 July 2014)

위하여, 본 논문에서는 면진된 원전구조물의 지진해석에서 면진장치를 등가선형모델과 비선형모델로 적용한 경우에 대하여 다양한 지진특성에 반영한 지진해석을 수행하고 지진응답을 비교, 평가하였다.

## 2. 면진된 원전구조물의 지진해석

원전구조물은 면진장치가 설치되면 지진에 의한 비선형거동은 면진장치에만 국한적으로 발생하고 상부구조물은 일반적으로 탄성거동을 하므로 상부구조는 탄성 보호소를 사용하여 모델링하였다. 면진장치의 해석모델은 등가선형모델과 비선형모델을 적용하여 비교하였으며 면진장치는 상부 매트구조물 아래에 위치하는 것으로 모델링하였다. 지진해석은 OpenSEES 프로그램[1]을 이용하여 수행하였으며, Fig. 1에 면진된 원전 구조물의 해석모델을 나타내었다.

본 연구에서 사용된 원전구조물은 면진된 원전구조물의 주기가 약 2 sec 가 되도록 25개의 면진장치를 설계하여 특성을 적용하였다. 이 해석모델은 SASSI-2000 [2]의 예제모델을 기본으로 한 것이다. 원전구조물인 상부구조물은 각각 외부격납건물, 내부건물로서 각 절점에 집중질량을 적용하고 각 절점을 빔(beam) 요소를 이용하여 집중질량 빔-스틱(beam-stick)모델로 모델링하였다.

본 연구에서 사용된 면진장치는 납-고무 받침(LRB)으로, 동일한 크기의 25개를 하부에 정사각형의 분포로 균일하게 배치하였다. 면진장치를 OpenSEES로 모델링하기 위하여 Elastomeric bearing 명령어[1]를 사용하여 모델링하였다.

25개의 납-고무받침은 비선형모델과 등가선형모델로 나누어서 모델링 하였는데 비선형모델과 등가선형모델의 설계 물성치를 Table 1에 비교하여 나타내었다.

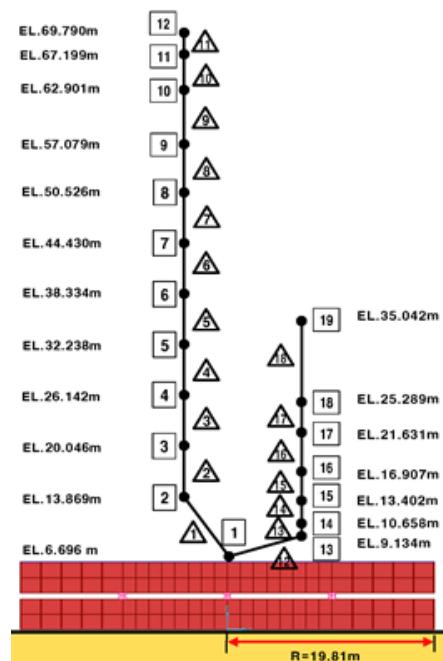


Fig. 1. Analysis model of NPP containment structure

## 3. 등가선형모델

납-고무받침의 비선형 거동특성은 이선형(bilinear) 거동으로 근사적으로 나타내는 것이 일반적이며 이를 등가선형모델로 전환할 경우에서 등가선형모델의 유효강성 및 유효 감쇠비로 나타내면 다음과 같다[5].

$$K_{eff} = \frac{|F_{max}| + |F_{min}|}{|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|} \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{EDC}{K_{eff}(|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|)^2} \quad (2)$$

여기서  $F_{max}$ 와  $F_{min}$ 은 각각 납-고무 받침의 최대, 최소전단강도를 의미하고,  $\Delta_{max}$ 와  $\Delta_{min}$ 은 각각 납-고무 받침의 최대변위와 최소변위, EDC는 하중의 한 사이클 당 소산되는 에너지로서, 면진장치의 비선형 거동에 의한 힘-변위 곡선의 면적을 의미한다.

등가선형모델을 적용한 지진해석의 경우에는 지진하중의 크기에 따른 등가선형모델의 정확한 물성치를 찾기 위한 반복과정이 필요하며 이 반복 과정을 요약하여 나타내면 Fig. 2와 같다. 등가선형모델의 반복과정을 설명하면, 먼저 면진장치의 초기 유효 강성( $K_{eff}$ )과 초기 유효 감쇠비( $\beta_{eff}$ )를 적절히 가정하여 응답이력해석을 수행한다. 이 해석결과로부터 구한 면진장치 최대변위( $\Delta_{max}$ )에 대응하는 유효 강성( $K_{eff}$ )과 유효 감쇠비( $\beta_{eff}$ )를 재계산하여 이전의 값과 비교하여 차이가 기준치를 초과하면 해석을 반복하여 수행한다. 이 과정을 유효강성( $K_{eff}$ )과 최대변위( $\Delta_{max}$ )가 일정하게 수렴 할 때까지 반복한다. 유효강성( $K_{eff}$ )과 최대변위( $\Delta_{max}$ )가 일정하게 수렴되면 반복과정을 종료하고 이결과를 등가선형모델을 이용한 최종결과로 사용한다.



Fig. 2. Flow chart of iterative seismic analysis using equivalent linear model

## 4. 등가선형모델과 비선형모델을 적용한 면진된 원전의 지진응답 비교

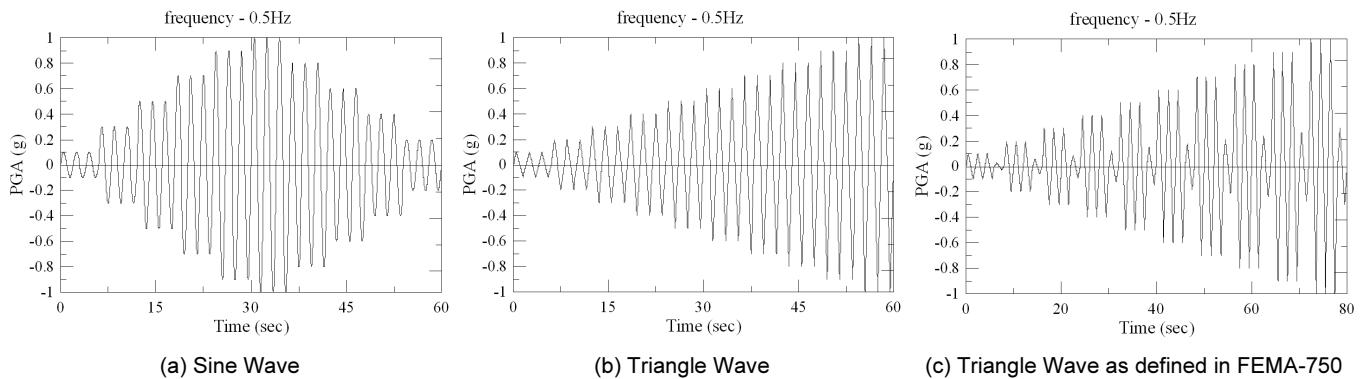
### 4.1 인공가속도이력 생성

면진장치의 해석모델로써 등가선형모델과 비선형모델의 지진응답 차이의 원인분석을 효과적으로 수행하기 위하여 싸인파(sine wave) 형태의 인공 가속도이력을 생성하여 사용하였는데 0.5 Hz~1 Hz의 진동수별로 가

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

Model	Parameter	Value
Nonlinear LRB Model	$K_u$ (elastic stiffness)	$4.504 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	$K_d$ (second-slope stiffness)	$7.508 \times 10^3 \text{ kN/m}$
	$Q_d$ (characteristic strength)	$6.008 \times 10^2 \text{ kN}$
Equivalent linear LRB Model	$K_{eff}$ (effective stiffness)	$1.5016 \times 10^4 \text{ kN/m}$
	$\beta_{eff}$ (effective damping)	10%

The graph illustrates the force-displacement relationship for two types of LRB models. The vertical axis is labeled 'Force' and the horizontal axis is 'Displacement'. A red line represents the hysteresis loop of the Nonlinear LRB Model, showing a primary loading path from origin to maximum force  $F_{max}$  at displacement  $\Delta_{max}$ , and a return path to zero force at displacement  $\Delta_y$ . A black line represents the Equivalent linear LRB Model, showing a linear relationship between force and displacement up to a yield point  $F_y$  at displacement  $\Delta_y$ , followed by a stiffer slope  $K_d$ . Parameters labeled include  $F_{min}$ ,  $Q_d$ ,  $K_u$ ,  $K_d$ ,  $K_{eff}$ ,  $F_{max}$ ,  $\Delta_{max}$ ,  $\Delta_y$ , and  $\Delta_{min}$ . A green line labeled 'EDC' indicates the Effective Damping Capacity.

**Fig. 3.** Several artificial acceleration history used in this study

속도진폭( $P$ )은  $0.1 \text{ g} \sim 1 \text{ g}$ 가 되도록 54개의 인공파를 생성하여 사용하였다. 즉, 가속도 이력은  $a(t)=P*\sin(\omega t)$ 를 이용하여 구하였다. 여기서,  $\omega$ 는 구조물의 가력진동수를 나타낸다. Fig. 3(a)와 같이 3사이클 반복하는 싸인파를 진폭이 각각  $0.1 \text{ g}, 0.3 \text{ g}, 0.5 \text{ g}, 0.7 \text{ g}, 0.9 \text{ g}, 1.0 \text{ g}, 0.8 \text{ g}, 0.6 \text{ g}, 0.4 \text{ g}, 0.2 \text{ g}$ 가 되는 순서로 생성하여 사용하였다.

싸인파와 유사한 형태인 삼각형파를 생성하여 적용하였으며, 싸인파와 유사하게  $0.5\text{Hz} \sim 1\text{Hz}$ 의 진동수별로 진폭이  $0.1 \text{ g} \sim 1 \text{ g}$ 까지 (진폭증가순서는  $0.1 \text{ g}, 0.2 \text{ g}, 0.3 \text{ g}, 0.4 \text{ g}, 0.5 \text{ g}, 0.6 \text{ g}, 0.7 \text{ g}, 0.8 \text{ g}, 0.9 \text{ g}, 1.0 \text{ g}$ 로 증가) 증가되는 형태로 생성하였으며 생성된 파형은 Fig. 3(b)와 같다. 이와 비슷한 형태이지만 Fig. 3(c)에 나타낸 바와 같이 Fema P-750보고서[3]에 따라 삼각형파를 생성하였다. 이는 Fig. 3(b)와 비교하여 보면 동일한 진폭의 3회 반복 사이클 이후에 작은 진폭의 한 사이클의 파형이 추가된 형태이다.

#### 4.2 인공가속도이력을 이용한 등가선형모델과 비선형모델의 응답비교

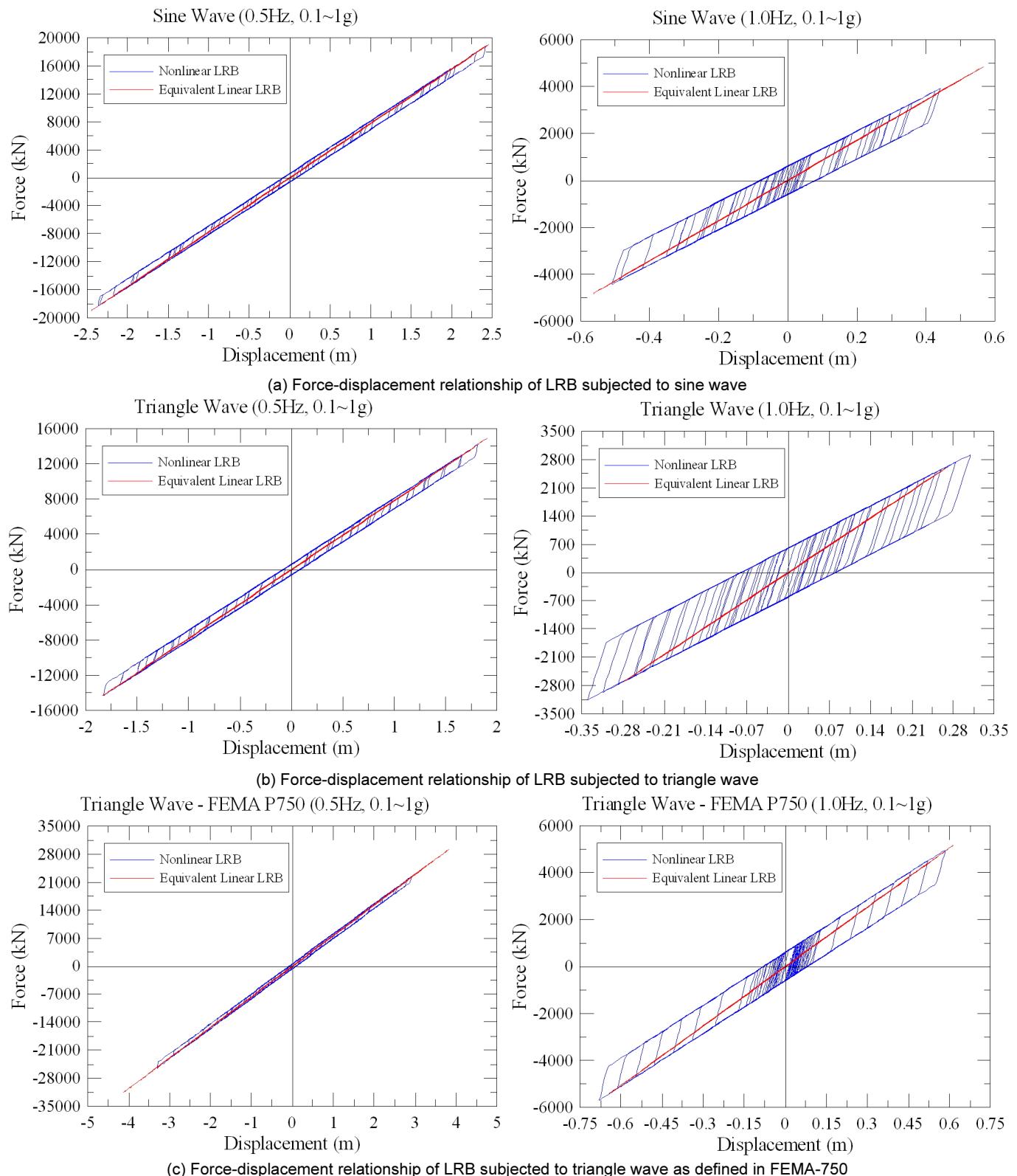
Fig. 3(a)에 나타낸 싸인파 인공지진을 이용하여 해석한 납-고무반침 힘-변위 관계를 가력 진동수  $0.5 \text{ Hz}$ 와  $1.0 \text{ Hz}$ 로 구분하여 비교하여 Fig. 4(a)에 나타내었다.  $0.5 \text{ Hz}$  가력 진동수의 싸인파에 대한 경우는 등가선형모델과 비선형모델에 의한 최대변위응답이 유사하게 나타났다. 반면  $1 \text{ Hz}$ 의 가력 진동수의 싸인파에 대한 경우는 등가선형모델이 비선형모델의 납-고무반침 힘-변위 관계곡선 보다 변위응답을 약 10% 정도 크게 평가함을 알 수

있다. Fig. 4(b)는 Fig. 3(b)와 같은 삼각형파를 이용하여 해석을 수행한 경 우인데,  $0.5 \text{ Hz}$  가력 진동수인 경우에 등가선형모델과 비선형모델에 의한 최대변위응답이 유사함을 보였으며,  $1 \text{ Hz}$ 의 삼각형파를 이용하여 해석을 수행하였을 경우에는 비선형모델의 변위응답이 등가선형모델의 변위응답 보다 약 15% 정도 작게 평가되는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 Fig. 3(c)와 같은 가속도이력을 이용하여 해석한 결과인데,  $0.5 \text{ Hz}$ 의 진동수 가속도이력을 이용하여 해석을 수행한 경우, 등가선형모델이 비선형모델의 납-고무반침 힘-변위 관계곡선 보다 변위응답을 약 20% 정도 크게 평가함을 알 수 있다.  $1 \text{ Hz}$ 의 경우에는 유사한 변위응답을 나타냄을 알 수 있다.

전반적으로 간단한 파형의 가속도이력을 적용한 경우에는 면진장치의 등가선형모델이 비선형모델을 적용한 경우와 유사한 변위응답을 예측하는 것을 알 수 있었으며 그 차이는 20% 이내이다.

#### 4.3 다양한 지반특성의 지진가속도

본 연구에서는 Geomatrix 3rd letter site classification[4] 따른 지반분류에 의한 5가지 지반등급 Site A, Site B, Site C, Site D의 각 50개의 지진과 Site E의 22개 지진을 사용하였다. Site E는 연약지반에 계측된 강진으로 계측기록이 부족하여 수평분 22개만 사용하였다. Geomatrix 지반분류 특성은 Table 2에 나타내었고, 본 논문에 사용한 총 222개의 지진가속도 기록 특성을 지반등급별 분류하여 Table 3에 정리하여 나타내었다.

**Fig. 4.** Comparison of force-displacement relationships of LRB subjected simple artificial accelerations

#### 4.4 등가선형모델과 비선형모델의 지진응답 비교

등가선형모델은 Table 1과 Fig. 2에 나타낸 개념처럼 비선형모델의 응답과 최대변위가 동일하도록 유효강성과 유효감쇠비를 정하는 방법으로,

초기에 가정한 변위와 해석에 의한 변위응답의 차이가 수렴한계치를 초과할 경우에는 반복해석과정을 통하여 가정된 변위와 해석에 의한 변위가 수렴하도록 하는 과정을 포함한다. 등가선형모델의 반복해석에 따른 수렴성을 알아보기 위하여 각 지반종류별 대표적인 지진가속도기록에 대하여 응

**Table 2.** Geomatrix 3<sup>rd</sup> Letter Site Classification: Geotechnical Subsurface Characteristics

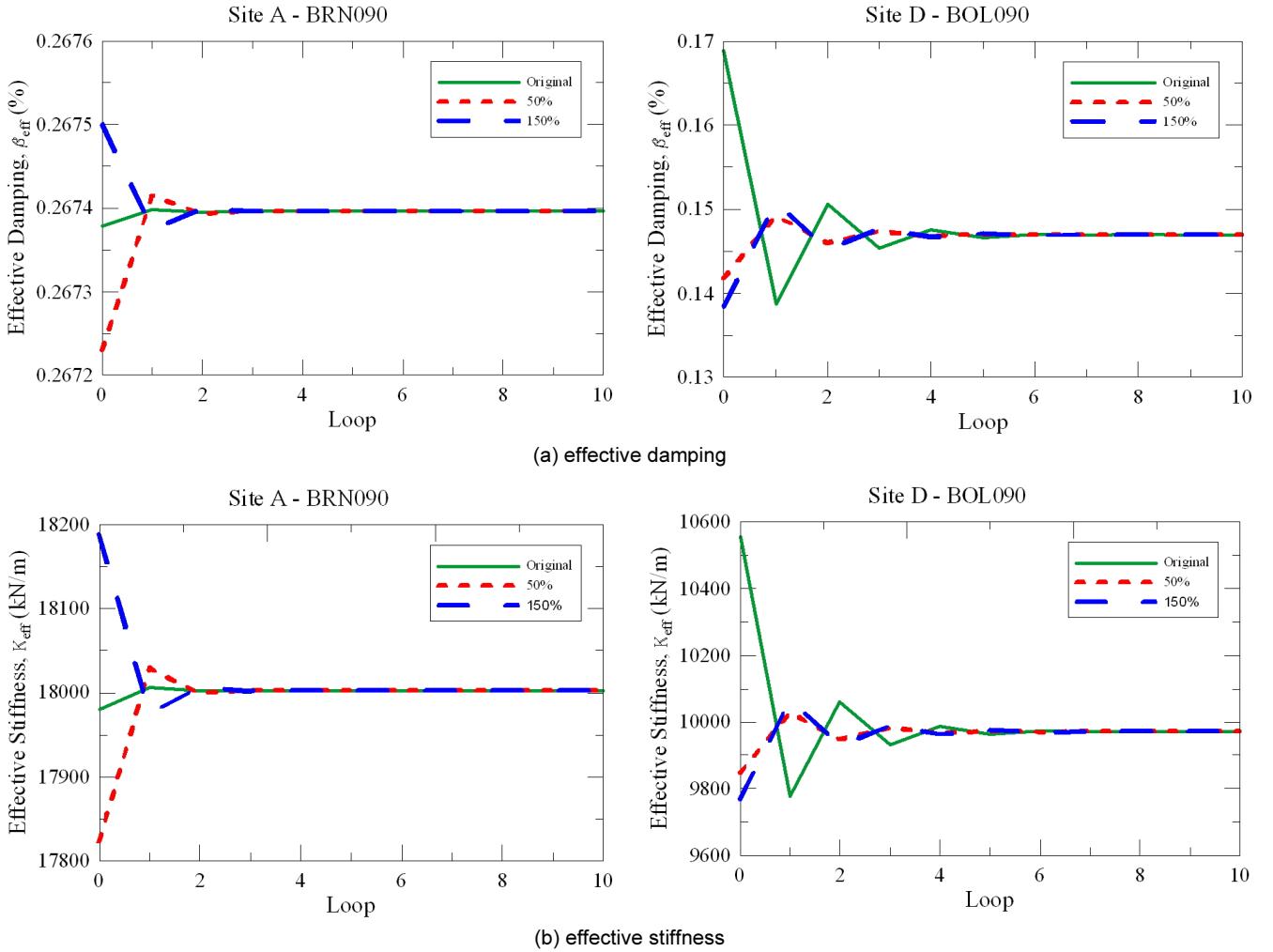
Site Class	Geotechnical Subsurface Characteristics	Used Record
A	Rock. Instrument on rock ( $V_s > 600$ mps) or < 5m of soil over rock.	50
B	Shallow (stiff) soil. Instrument on/in soil profile up to 20m thick overlying rock.	50
C	Deep narrow soil. Instrument on/in soil profile at least 20m thick overlying rock, in a narrow canyon or valley no more than several km wide.	50
D	Deep broad soil. Instrument on/in soil profile at least 20m thick overlying rock, in a broad valley.	50
E	Soft deep soil. Instrument on/in deep soil profile with average $V_s < 150$ mps.	22

**Table 3.** Characteristic of earthquake records used in this study

NO.	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)
1	Coalinga 1983 (A-ATC270), 0.576	Duzce, Turkey 1999 (375-E), 0.514	Coalinga 1983 (A-COM140), 0.195	Imperial Valley 1979 (A-E06230), 0.366	Morgan Hill 1984 (A01040), 0.046
2	Coalinga 1983 (A-ATC360), 0.673	Duzce, Turkey 1999 (375-N), 0.97	Northridge 1994 (A-COM230), 0.201	Chalfant Valley 1986 (A-ZAK270), 0.447	Morgan Hill 1984 (A01310), 0.068
3	Coalinga 1983 (A-ATP270), 0.452	Coalinga 1983 (A-CPL000), 0.292	N. Palm Springs 1986 (A-CWC270), 0.25	Chalfant Valley 1986 (A-ZAK360), 0.400	Whittier Narrows 1987 (A-TOR090), 0.031
4	Coalinga 1983 (A-ATP360), 0.412	Whittier Narrows 1987 (A-GRV060), 0.384	Whittier Narrows 1987 (A-GLP177), 0.296	Duzce, Turkey 1999 (BOL000), 0.728	Whittier Narrows 1987 (A-TOR180), 0.051
5	Coalinga 1983 (A-COL000), 0.313	Whittier Narrows 1987 (A-GRV330), 0.457	Whittier Narrows 1987 (A-OLD000), 0.231	Duzce, Turkey 1999 (BOL090), 0.822	Kocaeli, Turkey 1999 (ATS000), 0.249
6	Coalinga 1983 (A-COL090), 0.343	Coalinga 1983 (A-OLC360), 0.284	Whittier Narrows 1987 (A-OLD090), 0.258	Coalinga 1983 (D-BNT360), 0.323	Duzce, Turkey 1999 (ATS030), 0.038
7	Whittier Narrows 1987 (A-GRN180), 0.304	Coalinga 1983 (A-PLM360), 0.289	Northridge 1994 (BRC090), 0.206	Coalinga 1983 (D-CHP000), 0.324	Kocaeli, Turkey 1999 (ATS090), 0.184
8	Loma Prieta 1989 (A-LUL000), 0.484	Whittier Narrows 1987 (A-TAR000), 0.449	Parkfield 1966 (C05085), 0.442	Coalinga 1983 (D-CHP090), 0.605	Duzce, Turkey 1999 (ATS300), 0.025
9	Loma Prieta 1989 (BRN000), 0.453	Loma Prieta 1989 (A-TAR090), 0.644	Parkfield 1966 (C05355), 0.367	Coalinga 1983 (D-PVP360), 0.408	Kobe 1995 (KAK000), 0.251
10	Loma Prieta 1989 (BRN090), 0.501	Friuli, Italy 1976 (A-TMZ270), 0.315	Loma Prieta 1989 (CAP000), 0.529	Coalinga 1983 (D-PVY045), 0.602	Kobe 1995 (KAK090), 0.345
11	Superstition Hills(B) 1987 (B-SUP045), 0.682	Livermore 1980 (B-KOD180), 0.301	Loma Prieta 1989 (CAP090), 0.443	Coalinga 1983 (D-PVY135), 0.327	Loma Prieta 1989 (NAS180), 0.268
12	Superstition Hills(B) 1987 (B-SUP135), 0.894	Northridge 1994 (C08320), 0.273	Northridge 1994 (CWC180), 0.298	Duzce, Turkey 1999 (DZC180), 0.348	Loma Prieta 1989 (NAS270), 0.209
13	Coalinga 1983 (C-ATC270), 0.33	Whittier Narrows 1987 (CLS000), 0.644	Northridge 1994 (CWC270), 0.271	Kocaeli, Turkey 1999 (DZC180-1), 0.312	Kobe 1995 (NIS000), 0.509
14	Coalinga 1983 (C-ATP270), 0.378	Loma Prieta 1989 (CLS090), 0.479	Northridge 1994 (CYP053), 0.21	Duzce, Turkey 1999 (DZC270), 0.535	Kobe 1995 (NIS090), 0.503
15	Victoria, Mexico 1980 (CPE045), 0.621	Coalinga 1983 (C-OLC270), 0.387	Kocaeli, Turkey 1999 (FAT000), 0.187	Kocaeli, Turkey 1999 (DZC270-1), 0.358	Kobe 1995 (OSA000), 0.079
16	Victoria, Mexico 1980 (CPE315), 0.587	Coalinga 1983 (C-OLC360), 0.37	Northridge 1994 (GLP177), 0.357	Erzincan, Turkey 1992 (ERZ-EW), 0.496	Kobe 1995 (OSA090), 0.064
17	Cape Mendocino 1992 (CPM000), 1.497	Tabas, Iran 1978 (DAY-LN), 0.328	Northridge 1994 (GLP267), 0.206	Erzincan, Turkey 1992 (ERZ-NS), 0.515	Kobe 1995 (SHI000), 0.243
18	Cape Mendocino 1992 (CPM090), 1.039	Tabas, Iran 1978 (DAY-TR), 0.406	Whittier Narrows 1987 (H08000), 0.25	Coalinga 1983 (F-CHP000), 0.431	Kobe 1995 (SHI090), 0.212
19	Morgan Hill 1984 (CYC195), 0.711	Coalinga 1983 (D-OLC270), 0.866	N. Palm Springs 1986 (H08090), 0.239	Coalinga 1983 (F-CHP090), 0.733	Kobe 1995 (TAK000), 0.611
20	Coyote Lake 1979 (CYC250), 0.279	Coalinga 1983 (D-OLC360), 0.447	Northridge 1994 (H12180), 0.257	Coyote Lake 1979 (G02140), 0.339	Kobe 1995 (TAK090), 0.616
21	Morgan Hill 1984 (CYC285), 1.298	Coalinga 1983 (D-PLM270), 0.272	Coalinga 1983 (H-PV1090), 0.23	Imperial Valley 1979 (H-AEP045), 0.327	Kobe 1995 (TAZ000), 0.693
22	Mammoth Lakes 1980 (CYC285-1), 0.484	Coalinga 1983 (D-PLM360), 0.29	Imperial Valley 1979 (H-SHP000), 0.287	Imperial Valley 1979 (H-AGR003), 0.370	Kobe 1995 (TAZ090), 0.694

**Table 3.** Characteristic of earthquake records used in this study (continued)

NO.	Site A	Site B	Site C	Site D
	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)	Earthquake (Record ID), PGA (g)
23	Coalinga 1983 (D-SKH270), 0.375	Parkfield 1966 (FAR000), 0.273	Imperial Valley 1979 (H-SHP270), 0.506	Imperial Valley 1979 (H-BCR140), 0.588
24	Coalinga 1983 (D-TSM270), 0.84	Morgan Hill 1984 (G06090), 0.292	Morgan Hill 1984 (HVR240), 0.312	Imperial Valley 1979 (H-BCR230), 0.775
25	Coalinga 1983 (D-TSM360), 1.083	Coyote Lake 1979 (G06230), 0.434	Coalinga 1983 (H-Z14000), 0.282	Imperial Valley 1979 (H-DLT352), 0.351
26	Loma Prieta 1989 (G01000), 0.411	Coyote Lake 1979 (G06320), 0.316	Coalinga 1983 (H-Z14090), 0.274	Imperial Valley 1979 (H-E02140), 0.315
27	Loma Prieta 1989 (G01090), 0.473	Loma Prieta 1989 (GIL067), 0.357	Whittier Narrows 1987 (H-Z16000), 0.195	Imperial Valley 1979 (H-E04140), 0.485
28	Gazli, USSR 1976 (GAZ000), 0.608	Loma Prieta 1989 (GIL337), 0.325	Landers 1992 (JOS000), 0.274	Imperial Valley 1979 (H-E04230), 0.360
29	Gazli, USSR 1976 (GAZ090), 0.718	Loma Prieta 1989 (GMR090), 0.323	Landers 1992 (JOS090), 0.284	Imperial Valley 1979 (H-E05140), 0.519
30	Mammoth Lakes 1980 (I-LUL000), 0.43	Northridge 1994 (KAT000), 0.877	Whittier Narrows 1987 (MAN000), 0.201	Imperial Valley 1979 (H-E05230), 0.379
31	Northridge 1994 (LAC180), 0.316	Northridge 1994 (KAT090), 0.64	Northridge 1994 (MU2035), 0.617	Imperial Valley 1979 (H-E06140), 0.410
32	Landers 1992 (LCN000), 0.785	Kobe 1995 (KJM000), 0.821	Northridge 1994 (MU2125), 0.444	Imperial Valley 1979 (H-E06230), 0.439
33	Landers 1992 (LCN275), 0.721	Kobe 1995 (KJM090), 0.599	Northridge 1994 (MUL009), 0.416	Imperial Valley 1979 (H-E07140), 0.338
34	Loma Prieta 1989 (LGP000), 0.563	San Fernando 1971 (L12021), 0.366	Northridge 1994 (MUL279), 0.516	Imperial Valley 1979 (H-E07230), 0.463
35	Loma Prieta 1989 (LGP090), 0.605	San Fernando 1971 (L12291), 0.283	Landers 1992 (MVH000), 0.188	Imperial Valley 1979 (H-E08140), 0.602
36	Mammoth Lakes 1980 (L-LUL000), 0.921	San Fernando 1971 (ORR021), 0.921	N. Palm Springs 1986 (MVH045), 0.218	Imperial Valley 1979 (H-E08230), 0.454
37	Mammoth Lakes 1980 (L-LUL090), 0.408	Northridge 1994 (ORR090), 0.408	N. Palm Springs 1986 (MVH135), 0.205	Imperial Valley 1979 (H-E11140), 0.364
38	Loma Prieta 1989 (LOB000), 0.45	San Fernando 1971 (ORR291), 0.45	Trinidad offshore 1983 (RDE000), 0.194	Coalinga 1983 (H-E11230), 0.380
39	Loma Prieta 1989 (LOB090), 0.395	Northridge 1994 (ORR360), 0.395	Cape Mendocino 1992 (RIO270), 0.385	Imperial Valley 1979 (H-EDA270), 0.352
40	Northridge 1994 (PAC175), 0.415	San Fernando 1971 (PCD164), 0.415	Cape Mendocino 1992 (RIO360), 0.549	Imperial Valley 1979 (H-EDA360), 0.480
41	Northridge 1994 (PAC265), 0.434	San Fernando 1971 (PCD254), 0.434	Northridge 1994 (RRS228), 0.838	Imperial Valley 1979 (H-EMO000), 0.314
42	Northridge 1994 (PUL104), 1.585	Northridge 1994 (PKC090), 1.585	Northridge 1994 (RRS318), 0.472	Imperial Valley 1979 (H-EMO270), 0.296
43	Northridge 1994 (PUL194), 1.285	Northridge 1994 (PKC360), 1.285	Northridge 1994 (SMV180), 0.245	Imperial Valley 1979 (H-PVP045), 0.380
44	Nahanni, Canada 1985 (S1010), 0.978	Kocaeli, Turkey 1999 (SKR090), 0.978	Tabas, Iran 1978 (TAB-LN), 0.836	Coalinga 1983 (H-PVY045), 0.592
45	Nahanni, Canada 1985 (S1280), 1.096	Northridge 1994 (SUN190), 1.096	Tabas, Iran 1978 (TAB-TR), 0.852	Coalinga 1983 (H-PVY135), 0.551
46	Nahanni, Canada 1985 (S2240), 0.489	Northridge 1994 (TAR090), 0.489	Northridge 1994 (TUJ352), 0.245	Imperial Valley 1979 (H-QKP085), 0.309
47	Nahanni, Canada 1985 (S2330), 0.323	Northridge 1994 (TAR360), 0.323	Northridge 1994 (WPI046), 0.455	Imperial Valley 1940 (I-ELC180), 0.313
48	Loma Prieta 1989 (SLC360), 0.278	Friuli, Italy 1976 (TMZ000), 0.278	Northridge 1994 (WPI316), 0.325	Cape Mendocino 1992 (PET000), 0.590
49	Parkfield 1966 (TMB205), 0.357	Loma Prieta 1989 (UC2000), 0.357	N. Palm Springs 1986 (WWT180), 0.492	Cape Mendocino 1992 (PET090), 0.662
50	Northridge 1994 (UNI005), 0.493	Loma Prieta 1989 (UC2090), 0.493	N. Palm Springs 1986 (WWT270), 0.612	Kocaeli, Turkey 1999 (YPT330), 0.349

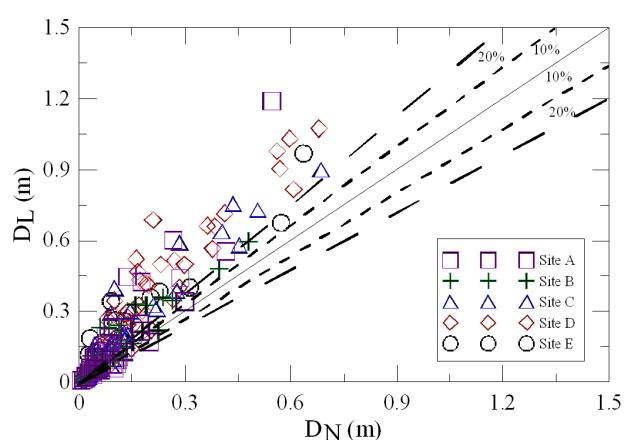


**Fig. 5.** Convergence for effective damping and effective stiffness of equivalent linear model during repeated process

답이력해석을 수행한 후, 반복해석에 따른 등가선형모델의 유효감쇠비와 유효강성을 Fig. 5에 나타내었다. 3~4번 반복과정부터 최대변위( $\Delta_{max}$ )가 안정적으로 수렴함에 따라 유효 강성( $K_{eff}$ )과 유효 감쇠비( $\beta_{eff}$ )가 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다.

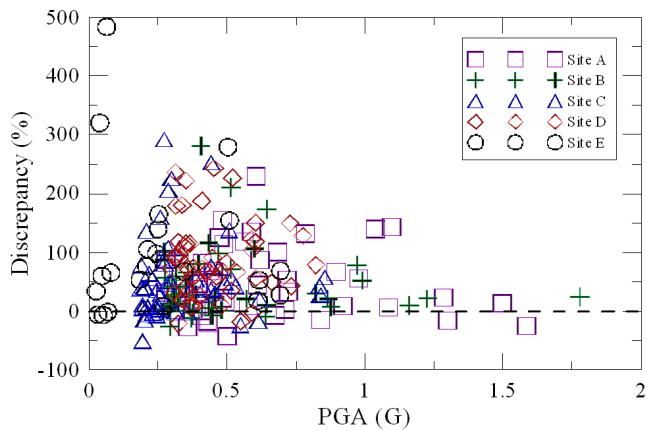
각 지반등급별 지진분류에 따른 Site A, B, C, D, E에 따른 면진시스템의 등가선형모델과 비선형모델의 최대변위를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 세로축은 등가선형모델을 사용하여 면진장치를 모델링하여 응답이력해석을 수행하여 구한 최대변위( $DL$ )를 나타낸 것이고 가로축은 비선형모델(bilinear 모델)을 사용하여 면진장치를 모델링하여 응답이력해석을 수행하여 구한 최대변위( $DN$ )를 나타낸 것이다. 그림에서 대각선에 가까울수록 등가선형모델과 비선형모델의 결과가 잘 일치함을 나타낸 것이다. 대부분의 결과가 대각선 왼쪽 윗부분에 치우친 것을 알 수 있다. 이는 대체로 모든 Site별 지진에서 유사하게 나타나고 있으며 등가선형모델에 의한 면진장치의 최대변위응답이 비선형모델의 최대변위응답보다 크게 평가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에 나타낸 결과를 이용하여 Fig. 7(a)에는 입력지진의 최대지반속도(PGA)별 불일치율(discrepancy)을 작성하여 나타내었으며, 불일치율은 비선형모델이 실제적인 면진장치의 거동을 정확하게 나타내는 모델

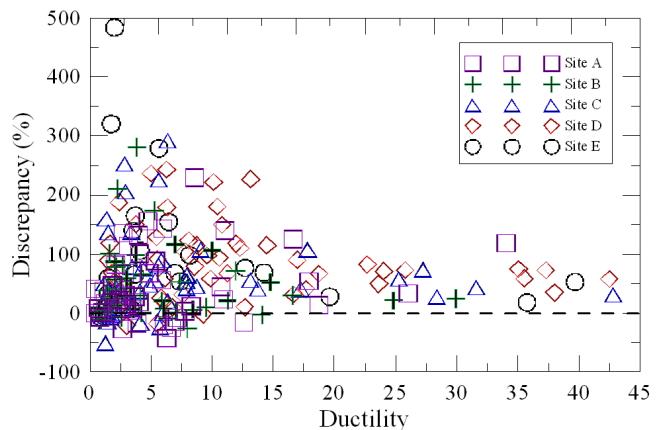


**Fig. 6.** Comparison of maximum displacements (DL) of equivalent linear LRB and maximum displacements (DN) of nonlinear LRB

이므로 이를 기준으로 등가선형모델의 불일치율을 식(3)을 이용하여 구한 것이다. 불일치율이 양의 값이면 등가선형모델이 비선형모델에 비하여 응답을 크게 평가함을 의미하고, 불일치율이 음의 값을 나타내면 반대의 경우

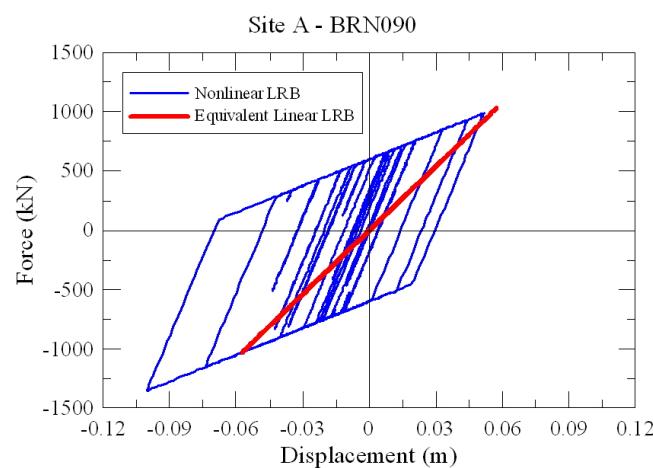


(a) discrepancy corresponding to PGA level

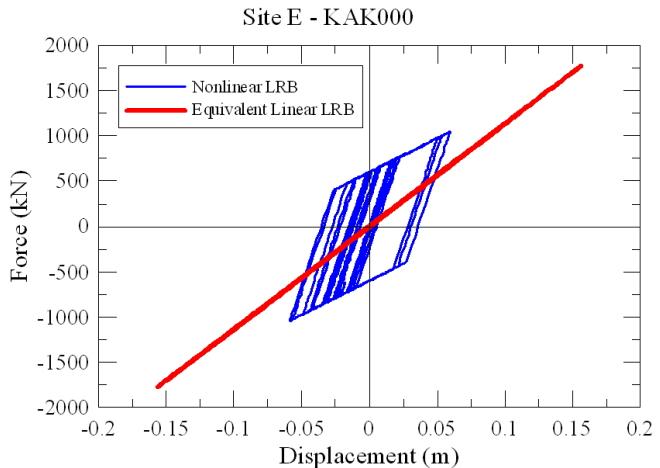


(b) discrepancy corresponding to ductility level

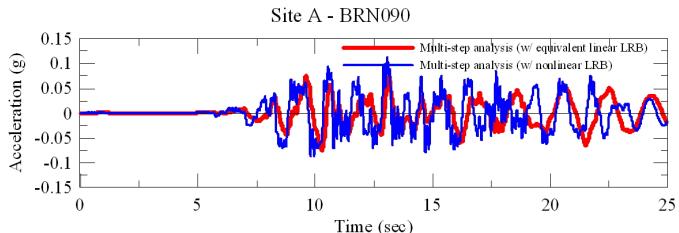
Fig. 7. Discrepancy of displacement response of LRB corresponding to PGA and ductility levels



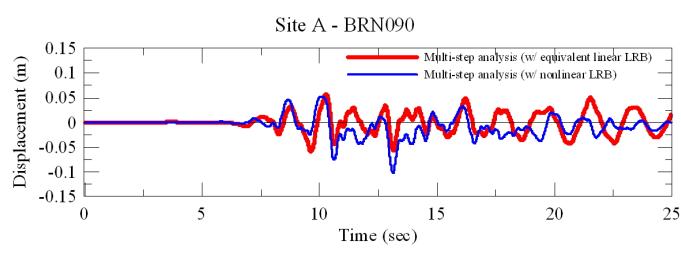
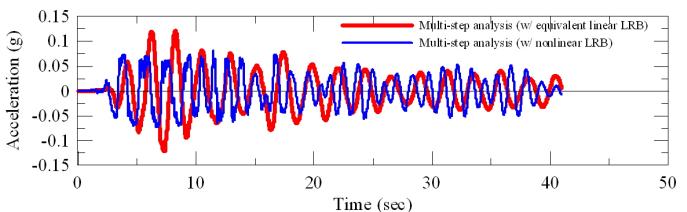
(a) force-displacement relationship



Site E - KAK000



(b) acceleration response



(c) displacement response

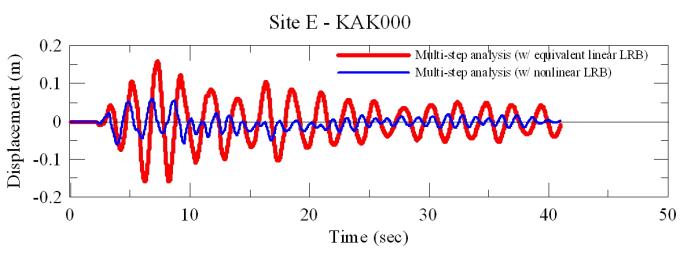
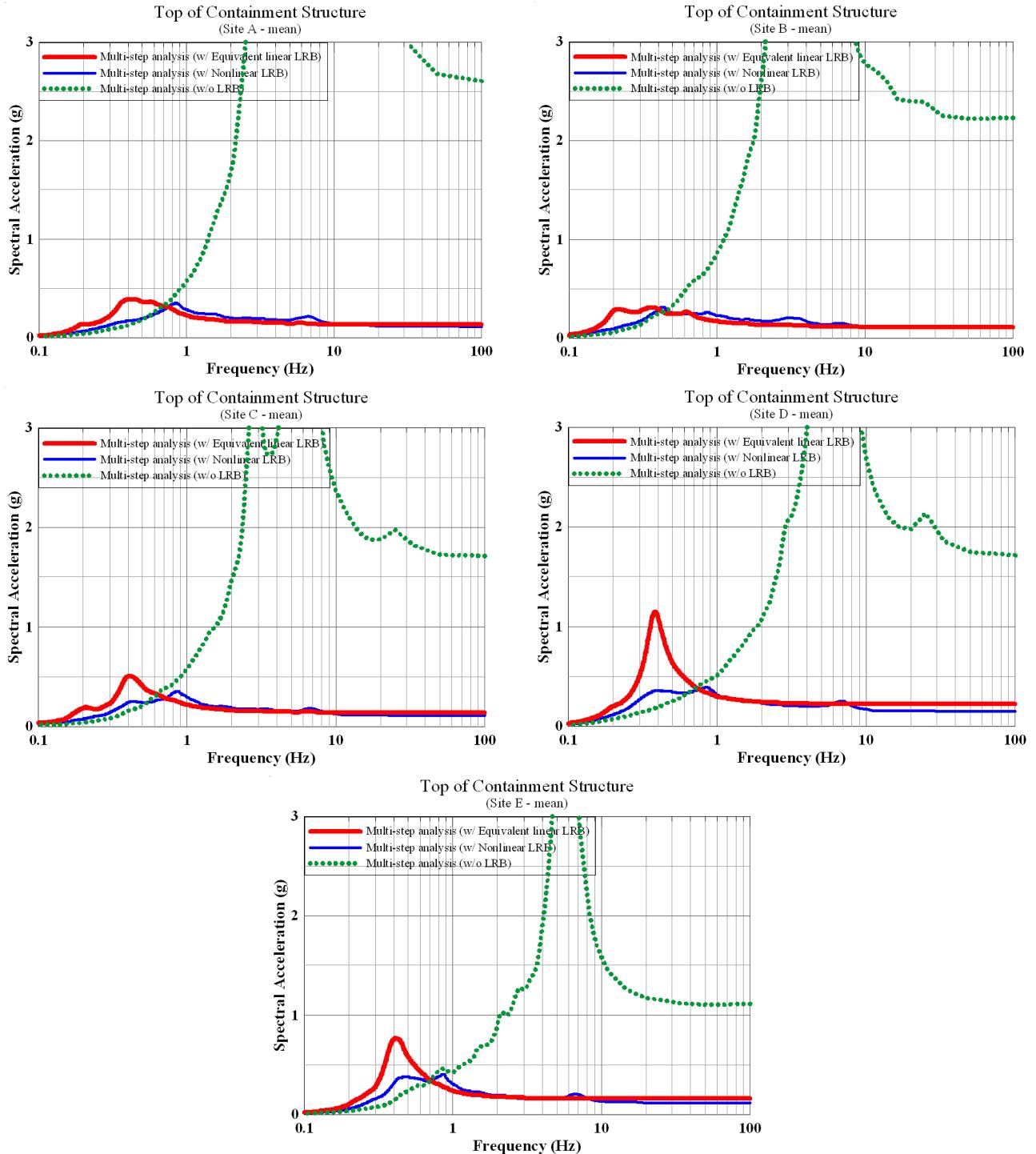


Fig. 8. Comparison of seismic responses of equivalent linear LRB and nonlinear LRB

를 의미한다. Fig. 7(b)에는 면진장치의 최대변위를 변위연성도(=최대변위/항복변위)로 전환한 경우에 변위연성도의 정도에 따른 불일치율을 나타내었다. 불일치율을 구하는 식은 식 (3)과 같다.

$$\text{불일치율 (discrepancy)} = \left( \frac{D_L - D_N}{D_N} \right) \times 100 (\%) \quad (3)$$



**Fig. 9.** Comparison of mean floor response spectrum at the top of NPP containment structures subjected to earthquakes corresponding to different site class

여기서  $D_L$ 은 등가선형모델을 사용하여 구한 면진장치의 최대변위응답이고  $D_N$ 은 비선형모델을 사용하여 구한 면진장치의 최대변위응답이다.

Fig. 7의 결과로부터 Site E에 대한 불일치율을 제외하고는 대체로 최소 약 -50%에서 최대 약 300%의 불일치율을 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 가장 연약한 지반인 Site E에 대해서는 최대 약 500%에 근접한 불일치율을 보이는 경우도 있었다. 연약지반에 가까운 지반일수록 등

가선형모델이 비선형모델에 비하여 변위응답을 과대평가하는 정도가 증가함을 알 수 있다. 또한, 지진의 최대지반가속도와 연성도의 정도에 관련하여 불일치율이 특정한 경향을 나타내지는 않고 연관성이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 8(a)에 나타낸 납-고무반침의 힘-변위 관계는 등가선형모델의 경우 직선으로 나타나며 비선형모델의 경우는 이선형(bilinear) 거동을 나타낸다. 등가선형모델과 비선형모델의 힘-변위의 최대값, 최소값이 모두 차이

를 보이는 것을 알 수 있는데, 특히 등가선형모델이 변위응답을 비선형모델에 비하여 작게 평가하는 경우와 크게 평가하는 경우의 대표적인 사례로 나타낸 것이다. 격납 구조물 상층부의 가속도이력과 변위이력을 각각 Fig. 8(b)와 8(c)에 비교하여 나타내었다. 등가선형모델이 비선형모델보다 변위응답을 작게 평가하는 경우(Fig. 8(a)의 Site A -BRN090 경우)의 유효 강성은 비선형모델의 평행사변형의 대각선이 이루는 선보다 기울기가 크므로 유효강성이 크게 평가되었다고 할 수 있으며, 반대의 경우(Fig. 8(a)의 Site E -KAK000 경우)에는 등가선형모델의 유효강성이 작게 평가되었기 때문으로 판단된다.

면진된 원전구조물의 면진장치를 등가선형모델과 비선형모델을 각각 적용하여 각 Site별 모든 지진에 대하여 응답이력해석을 수행하여 격납 구조물 상층부의 가속도응답을 구한 후에 이를 이용하여 층응답스펙트럼(floor response spectrum)을 구하였다. 이렇게 구한 층응답스펙트럼을 각 Site 별로 평균을 구한 후에 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 격납건물 상층부에서 층응답스펙트럼( $S_a$ )은 면진장치의 고유진동수인 0.5Hz부근에서는 등가선형모델이 비선형모델에 비하여 2~3배정도 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 0.8~10 Hz 범위의 진동수에서는 비선형모델의 가속도스펙트럼이 등가선형모델의 가속도스펙트럼 보다 10~30 % 정도 큰 값을 나타낸다. 또한 면진장치를 적용하지 않은 경우에 대하여도 면진장치의 효과를 분석하기 위하여 같이 비교하였는데 면진장치를 적용하지 않은 경우에는 0.5~0.8 Hz 이상의 진동수에서 가속도스펙트럼이 면진장치가 적용된 경우에 비하여 급격히 증가함을 알 수 있다. 100 Hz 부근의 가속도 스펙트럼값은 격납건물 상부의 최대가속도와 거의 일치할 것이므로, Fig. 9의 결과로부터 지반종류가 Site A에서 Site E로 갈수록 면진장치가 없는 경우에는 격납 건물의 상층부에서의 최대가속도 응답이 작아지는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 면진장치의 적용에 의해 원전구조물의 고진동수 영역(1 Hz 이상)의 지진응답이 약 0.3 g 미만으로 현저히 감소함을 알 수 있다. 등가선형모델의 경우는 지반의 특성이 연약해짐(Site D와 E의 경우)에 따라 0.5 Hz 부근의 가속도스펙트럼의 증가가 다른 지반그룹에 비하여 2~3배 정도 크게 나타남을 알 수 있다. 면진장치의 모델링에 등가선형모델을 적용할 경우에는 특히 지반이 Site D와 Site E 등급에 해당하는 경우에는 다른 지반의 경우보다 등가선형모델의 지진응답의 과대평가 정도가 증가함으로 보다 신중하게 적용할 필요가 있음을 의미한다. 또한 비선형모델의 적용에서는 0.5 Hz 부근의 가속도스펙트럼의 증가가 Site D와 E의 경우에 다른 Site에 비하여 1.5~2배 정도로 크게 나타난다. 이는 연약지반일 경우에는 면진장치 주기 부근에서 가속도응답이 증가할 수 있기 때문에 원전의 내부설비의 공진이 발생하지 않도록 신중을 기하여야 함을 의미한다.

## 5. 결 론

면진된 원전구조물에 지반-면진장차-구조물 상호작용효과를 고려한 진동수영역해석을 수행하기 위해서는 면진장치의 비선형모델을 등가선형모델로 전환하여 적용하여야 한다. 본 논문에서는 비선형성이 강한 납-고무반침을 등가선형모델로 적용한 경우와 비선형모델을 적용한 경우에 대하여 다양한 인공가속도이력과 지반의 종류에 따른 지진가속도 기록을 적용

하여 지진해석을 수행하고 이를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 간단한 파형의 가속도이력에 대해 면진장치를 등가선형모델로 적용한 경우의 변위응답이 비선형모델을 적용한 경우의 변위응답과의 차이가 ±20 % 이내로서 비교적 정확한 변위응답을 예측함을 알 수 있다.
- 2) 다양한 지반종류의 지진에 대하여 전반적으로 등가선형모델에 의한 면진장치의 최대변위응답이 비선형모델의 최대변위응답보다 크게 평가함을 알 수 있다. 따라서 면진장치에 등가선형모델을 적용하여 원전구조물을 설계하는 것은 보수적인 설계를 유발할 수 있다.
- 3) 지진의 최대지반가속도와 연성도의 정도에 관련하여 등가선형모델과 비선형모델의 변위응답의 불일치율이 일정한 경향을 나타내지는 않고 연관성이 없는 것으로 판단된다.
- 4) 면진된 원전 격납건물 상층부에서 층응답스펙트럼( $S_a$ )은 면진장치의 고유진동수인 0.5 Hz부근에서는 등가선형모델이 비선형모델에 비하여 2~3배정도 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 0.8~10 Hz 범위의 진동수에서는 비선형모델의 가속도스펙트럼이 등가선형모델의 가속도스펙트럼 보다 10~30 % 정도 큰 값을 나타낸다.
- 5) 지반종류가 Site A에서 Site E로 갈수록 면진장치가 없는 경우에는 격납 건물의 상층부에서의 최대가속도 응답이 작아지는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 면진장치의 적용에 의해 원전구조물의 고진동수 영역(1 Hz 이상)의 지진응답이 약 0.3 g 미만으로 현저히 감소함을 알 수 있다.
- 6) 연약지반일 경우에는 면진장치 주기 부근(본 연구에서는 2 초)에서 원전 격납건물의 가속도응답이 증가할 수 있기 때문에 원전의 내부설비에 공진현상이 발생하지 않도록 설계에 신중을 기하여야 한다.

## / 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원자력융합핵심 기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제에 의해 지원되었기에 이에 감사 드립니다. 또한 본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호: C1010805-01-01)로 지원되었기에 이에 감사드립니다.

## / REFERENCES /

1. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. (<http://opensees.berkeley.edu>), 2007.
2. Lysmer J, Ostatan F, Chin CC, A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley; c1999.
3. FEMA P750, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency of the U.S. Department of Homeland Security; c2009.
4. PEER Strong Motion Database[Internet]. Berkeley, California Avle from: <http://peer.berkeley.edu/smcat/sites.html>.

5. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft). c2012.
6. Lee JH, Song JK, Kim GJ, Kim NY. Nonlinear Analysis of Seismically Isolated NPP Containment Structure considering Various Seismic Characteristics. Conference on Earthquake Engineering Society of Korea, EESK. c2014.
7. Lee JH, Song JK. Applicability Evaluation of Equivalent Linear Model for Isolated NPP Containment Structure. Conference on Korea Society of Civil Engineering, KSCE. c2013.
8. Kim HU. Evaluation of the Applicability of Existing Design Formula for Seismic Isolation to Nuclear Power Plants. Journal of Engineering Society of Korea. 2012;16(6):29–36.
9. Kim HU, Joo KH, NOH SH, Jung CG. Behavior Analysis od a Seismically Isolated NPP Structure by Varying Seismic Input Generation Method and Strong Ground Motion Duration. Journal of Engineering Society of Korea. 2013;17(4):187–195.
10. LEE JH, Kim JK, Hong KJ. Characteristics of Earthquake Responses of an Isolated Containment Building in Nuclear Power Plants According to Natural Frequency of Soil. Journal of Engineering Society of Korea. 2013;17(6):245–255.
11. Choi DH, LEE SH. Generation of Floor Response Spectra including Equipment–Structure Interaction in Frequency Domain. Journal of Engineering Society of Korea. 2005;9(6):13–19.
12. Providakis CP. Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. Engineering Structures. 2008;30:1187–1198.
13. Ricardo AM, Ragunath S, Kevin MK. Floor response spectra for light components mounted on regular moment–resisting frame structures. Engineering Structures. 2006;28:1927–1940.
14. Ryan KL, Kelly JM, Chopra AK. Nonlinear Model for Lead–Rubber Bearings Including Axial–Load Effects. journal of Engineering Mechanics. 2005;131(12):1270–1278.
15. Kelly JM. Tension Buckling in Multilayer Elastomeric Bearings. journal of Engineering Mechanics. 2003;129(12):1363–1368.
16. Dicleli M, Buddaram S. Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect. Engineering Structures. 2007;29:21–32.