

마찰진자시스템의 강성중심 변화에 따른 면진된 원전 구조물의 지진응답평가

Seismic Response Evaluation of Seismically Isolated Nuclear Power Plant with Stiffness Center Change of Friction Pendulum Systems

석철근¹⁾ · 송종걸^{2)*}

Seok, Cheol-Geun¹⁾ · Song, Jong-Keol^{2)*}

¹⁾대한산업안전협회 건설안전본부, ²⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Korea Industrial Safety Association, Construction Safety Headquarters, ²⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

In order to improve the seismic performance of structures, friction pendulum system (FPS) is the most commonly used seismic isolation device in addition to lead rubber bearing (LRB) in high seismicity area. In a nuclear power plant (NPP) with a large self weight, it is necessary to install a large number of seismic isolation devices, and the position of the center of rigidity varies depending on the arrangement of the seismic isolation devices. Due to the increase in the eccentricity, which is the difference between the center of gravity of the nuclear structure and the center of stiffness of the seismic isolators, an excessive seismic response may occur which could not be considered at the design stage. Three different types of eccentricity models (CASE 1, CASE 2, and CASE 3) were used for seismic response evaluation of seismically isolated NPP due to the increase of eccentricity (0%, 5%, 10%, 15%). The analytical model of the seismic isolation system was compared using the equivalent linear model and the bilinear model. From the results of the seismic response of the seismically isolated NPP with increasing eccentricity, it can be observed that the effect of eccentricity on the seismic response for the equivalent linear model is larger than that for the bilinear model.

Key words: Nuclear power plant, Seismic isolation, Friction pendulum system, Eccentricity

1. 서론

원자력발전소(이하 원전) 구조물에 면진(지진격리)도 표현됨, 이하 면진으로 표기함)시스템을 적용하여 강진에 대한 지진 안전성을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있으며, 원전에 적용할 면진장치로는 주로 납-고무 받침(Lead Rubber Bearing, LRB)와 EQS (Eradl Quake System)에 대하여 주로 검토하고 있는 상황이다. 현재 국내에서 작성 중인 원전구조물의 면진설계기준(KEPIC-STC) [1]은 고무계열과 마찰계열 면진장치에 대한 적용을 언급하고 있다. 마찰진자시스템(Friction Pendulum System, FPS)도 전 세계적으로 많이 적용되는 마찰계열 면진장치로서 원전에 대한 적용성을 본 연구를 통하여 검토하고자 한다. 마찰진자시스템은 진자의 성질을 활용하여 고유주기를 임의로 조절할 수 있는 장점이 있는 면진장치다.

특징으로는 상부구조물의 자중을 지지하는 볼 베어링이 일정한 곡률을 지닌 복합형 재료소재의 마찰면에서 진자운동으로 인하여 곡률반경과 중력에 의한 마찰과 고유복원력에 의한 감쇠력을 갖는다는 것이다. 마찰진자시스템은 1985년 EPS (Earth Protection System)에서 처음 개발되었으며, 해외에서는 이에 대하여 활발히 연구되고 있으며 [2-5], 국내에서도 최근에 연구가 활성화되고 있는 상황이다. 전법규 등 [6]은 가변적인 고유 진동수를 가짐으로 인하여 특정 주파수에 응답특성을 집중시키지 않는 내진장치인 CFPBS (Cone-type Friction Pendulum Bearing System)를 개발하고 이 장치의 성능을 자유진동실험과 수치적 동적해석을 통하여 검증하였다. 이 연구에서 CFPBS의 이론적 모델을 정립하고 이론식과 설계식을 제안하였으며 이를 바탕으로 수치적 동적해석과 실시간 진동대 실험을 통하여 CFPBS의 내진성능을 평가함과 동시에 설계식의 타당성을 검증하였다. 김권일 등 [7]은 배관시스템에 대한 수치해석 및 진동대 시험을 통하여 진동저감 특성을 분석하고 마찰진자형 방진기의 내진 성능을 검토하여, 마찰진자형 방진기는 주로 20 Hz 이하 주파수 대역에서 진동이 저감되는 것을 확인하였다.

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received January 23, 2017; Revised July 3, 2017; Accepted August 23, 2017)

기존의 마찰진자시스템은 하나의 구면을 가지지만 여러 개의 구면을 가지는 다중구면 미끄러짐 베어링(multi-spherical sliding bearing)시스템으로 몇 가지 종류(Triple FPS, Modified Single FPS, Double FPS)가 개발되어 해석적인 거동과 실험적인 거동에 대하여 분석한 연구 등 [8, 9]이 있다. 본 연구에서는 일반적인 하나의 구면을 가진 마찰진자시스템에 대하여 연구를 수행하였다.

등가선형모델은 면진장치의 초기설계에 많이 사용되며 면진된 구조물의 고유주기를 가정하고 이를 구현하도록 면진장치를 설계하는데 사용된다. 마찰진자시스템의 힘-변위 응답도 강진에 의해 이선형(bilinear) 모델과 유사한 거동을 나타내기 때문에 실제 구조해석에서 등가선형모델과 이선형 모델이 해석모델로서 많이 사용된다. 마찰진자시스템에 의해 면진된 원전 구조물을 대상으로 면진장치를 등가선형 및 비선형모델로 각각 모델링한 경우에 대하여 지진응답을 비교하였다.

본 연구에서는 마찰진자시스템을 원전에 적용하는 경우에 대하여 면진 장치의 강성중심과 상부구조물의 질량중심의 차이인 편심정도에 따른 지진응답의 영향을 분석하였다. 면진장치들의 배치나 강성차이에 의해 영향을 받는 면진시스템의 강성 중심과 상부구조물의 질량중심간의 불일치로 인해 면진된 구조시스템의 비틀림 거동이 발생할 수 있으며, 이러한 비틀림 거동은 설계 시에 일반적으로 고려하는 응답이 아니기 때문에 예상치 못한 구조물의 손상을 유발할 수도 있다.

입력 지진으로는 ATC-63 프로젝트의 FEMA P-695 보고서 [10]에서 활용된 원거리 지진(far field ground motion)을 이용하였으며, 하부매트에 배치된 면진장치들의 부분적인 강성의 증가 또는 저하 정도의 가정에 따른 강성 중심의 변화를 통해 다양한 정도의 편심발생(면진장치의 강성중심과 상부구조물의 질량중심과의 차이)에 따른 면진된 원전구조물의 거동특성을 분석함으로써 편심효과가 면진된 원전구조물의 미치는 영향을 분석하였다.

2. 마찰진자시스템의 설계 및 모델링

2.1 마찰진자시스템의 원리

마찰진자시스템은 구형의 곡면과 고압에 견딜 수 있는 재료를 사용하며, 마찰계수가 작고 내열성 및 내식성이 우수한 PTFE를 기본소재로 이용하고 각종 금속(구리, 유리 등)을 혼합하여 사용하기도 한다. 마찰진자시스템 위의 상부 구조물은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 곡률반지름(R)을 축으로 진자처럼 거동한다. 마찰진자시스템은 구형의 곡면을 따라 진자운동을 할 때 마찰에 의해 에너지 흡수 및 소산이 발생하고 이러한 효과에 의해 지진하중을 감소시킨다.

AASHTO의 면진설계기준 [11]에서는 마찰진자시스템의 수평변위 사용범위를 0.2 R로 규정하고 있으며, Fig. 1에 나타난 마찰진자시스템의 각도 $\theta \approx 0$ 이라고 가정할 경우에 힘의 평행조건에 의해서 수평변위(U)에서의 수평력(F)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = \frac{W}{R \cos \theta} U + \frac{\mu W}{\cos \theta} \approx \frac{W}{R} U + \mu W_{sgn}(\dot{U}) \quad (1)$$

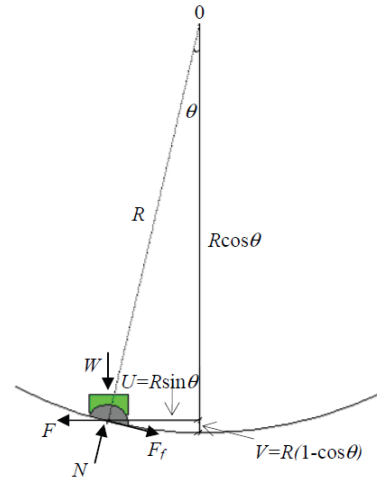


Fig. 1. Free body diagram of Friction Pendulum System

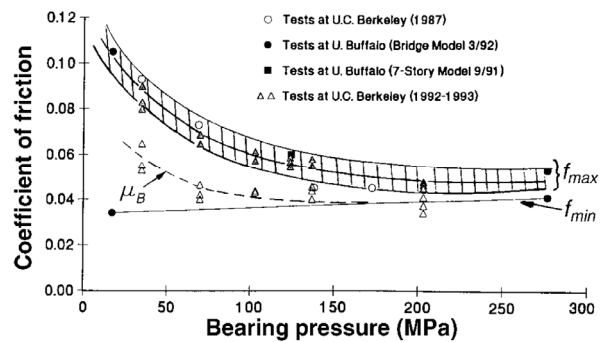


Fig. 2. Coefficient of Friction according to bearing pressure [12]

여기서, F 는 수평력, W 는 상부 구조물에 의한 수직재하하중, U 는 수평변위, μ 는 마찰계수, $\mu W_{sgn}(\dot{U})$ 는 방향성을 고려한 마찰력이다.

마찰진자시스템의 고유주기는 상부구조물의 질량과 무관하며, 곡률 반지름에 따라 다음과 같이 정의한다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2)$$

여기서, R 은 곡률 반지름이며 g 는 중력가속도이다.

마찰계수는 마찰진자시스템을 설계할 때 중요한 변수 중 하나이다. 면진 장치의 외-내부 온도, 진자운동 속도, 상부하중 등과 같은 영향인자에 따라 변하는 마찰계수는 설계 시에 결정하기 어렵다. FEMA-274 보고서 [12]에서는 여러 영향인자 중 상부하중에 위한 면압(bearing pressure)에 의해 변하는 마찰계수를 실험적 결과로부터 제시하여 Fig. 2에 나타내었다. 면압이 증가할수록 마찰계수는 감소하여 특정한 값에 수렴하는 경향을 나타낸다.

2.2. 마찰진자시스템의 등가선형모델

등가선형모델은 면진장치의 비선형적인 힘-변위응답을 유효강성과 유효감쇠를 이용하여 등가선형적인 거동으로 치환한 해석모델이다. FEMA-274 보고서 [12]와 ASCE 7-10 [13]에서 제시한 유효강성, 유효감쇠비를

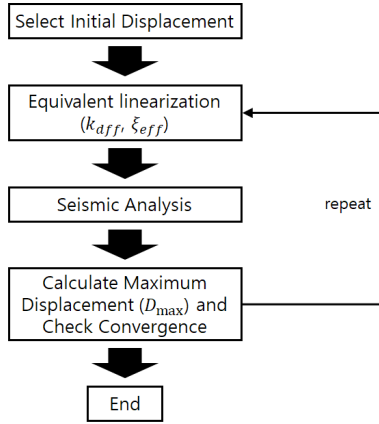


Fig. 3. Flow chart of iterative seismic analysis using equivalent linear model

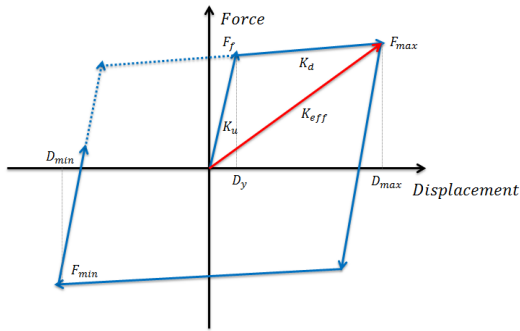


Fig. 4. Equivalent linear and nonlinear models of friction pendulum system

사용하여 등가선형모델을 구성하였다. 마찰진자시스템의 등가선형화 절차는 Fig. 3에 나타내었고, 목표주기를 정하여 곡률반지름을 결정하고 그에 상응하는 변위를 구하며, 유효강성 및 유효감쇠비를 산정한다. 면진장치 유효강성 및 유효감쇠비가 일정하게 수렴하도록 반복과정을 진행한다. 최종적으로 수렴되면 반복과정을 종료하고 등가선형모델의 최종물성치를 확정하여 이를 사용하여 지진해석을 수행한다.

등가선형모델의 유효강성(K_{eff})은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 최대변위 (D)와 수평력(F)의 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{F}{D} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (3)$$

면진된 구조물 설계 시 사용하는 유효주기는 마찰계수를 고려하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}g}} \quad (4)$$

마찰진자시스템의 유효 감쇠비 [14]는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{\mu + D/R} \quad (5)$$

2.3 마찰진자시스템의 비선형 모델

마찰진자시스템의 비선형 모델은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 이선형 (bilinear) 모델을 사용하였다. 이선형 모델을 정의하는 1차강성(K_u)과 2차강성(K_d)은 FEMA 274 보고서 [12]에 의거하여, 각각 식 (6)과 식 (7)로 정의할 수 있고, 1차 강성(K_u)은 식 (6)과 같이 마찰력(F_f)의 함수로 정의할 수 있다.

마찰진자시스템에서의 1차 강성(K_u)의 산정에 관하여 Naeim과 Kelly [15]는 1차강성의 평가가 어렵기 때문에 실험적인 방법을 추천하고 있으며, FEMA 274 [12]에서는 1차강성이 2차강성에 비하여 최소 100배 이상의 값을 사용하도록 권장한다.

$$K_u = \frac{\mu W}{D_y} = \frac{F_f}{D_y} \quad (6)$$

$$K_d = \frac{W}{R} \quad (7)$$

3. 면진된 원전구조물의 수치해석모델

3.1 면진된 원전구조물 모델링

면진된 원전 구조물은 SASSI 2000 [16]의 예제모델을 사용하였고 원전구조물의 하부매트에 36개의 마찰진자시스템을 설계하여 모델링하였으며 해석프로그램으로는 OpenSEES 프로그램 [17]을 사용하였다. 상부구조물은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 집중질량을 가진 18개의 beam-stick으로 모델링 하였으며 격납과 내부구조물을 구분하여 모델링하였다. 격납구조물은 높이 63.274 m, 내부구조물은 높이 28.346 m로 면진장치에 의해 지진하중이 상부구조물이 감소되어 전달되므로 상부구조물은 탄성거동을 하므로 탄성요소를 사용하여 모델링하였다

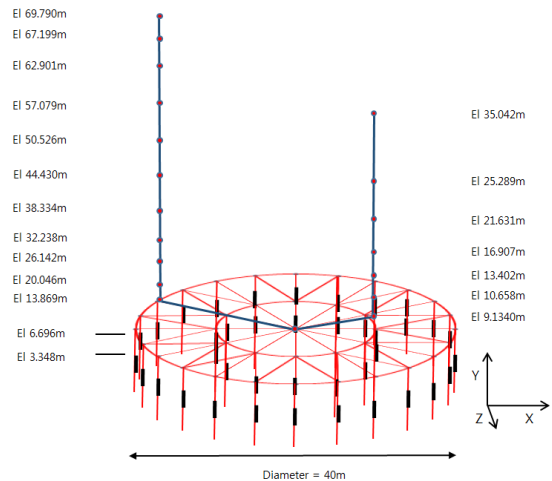


Fig. 5. Beam-stick model of seismically isolated NPP Structures with Friction Pendulum System

매트는 상·하부 매트로 분류하여 지름 40 m, 높이 6.696 m의 원형으로 모델링하였으며 무질량 강체로 모델링하였다. 매트의 마찰진자시스템은 OpeSEES 프로그램 [17]의 SingleFPBearing 명령어를 사용하여 균등하게 36개를 매트와 매트 사이에 배치시켰다. 마찰진자시스템의 종류는 단일 오목면(single concave)을 가진 마찰진자시스템을 사용하였다.

3.2 마찰진자시스템의 마찰계수 및 물성치 산정

Coulomb 마찰이론 [18]에 따르면 마찰계수는 상재압이나 마찰속도에

따라 변화하지 않는다고 정의하며 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \mu W = \mu mg \tag{8}$$

Coulomb 마찰이론에 따른 고정값인 마찰계수로는 Fig. 2의 결과를 이용하여 0.08(면압 49 Mpa 해당하는 고속마찰계수 값을 사용)을 사용하였다. 이는 거동 직후나 느린 속도에서 발생하는 저속마찰계수(f_{min})보다는 일정한 속도 이상으로 증가 후 수렴하는 고속마찰계수(f_{max})가 구조물의 거동에 보다 큰 영향을 주기 때문에 고속마찰계수 값을 사용하였다.

마찰진자시스템의 등가선형모델과 이선형 모델의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 마찰진자시스템의 등가선형모델을 적용할 경우에 고유주기가 2초 정도가 되도록 설계하여 물성치를 평가하였다.

Table 1. Material property of friction pendulum system

Model	Parameter	Value
Nonlinear FPS Model	K_u (elastic stiffness)	$1.613 \times 10^5 kN/m$
	K_d (second-slope stiffness)	$5.546 \times 10^3 kN/m$
	F_f (Friction strength)	$8.066 \times 10^2 kN$
Equivalent linear FPS Model	K_{eff} (effective stiffness)	$1.669 \times 10^5 kN/m$
	β_{eff} (effective damping)	28.87 %

Table 2. Characteristics of ground motion used in this study

Classification	Record Selection Criteria
Source Magnitude	Large magnitude, $M \geq 6.5$ events
Source Type	Strike-Slip and Reverse Sources
Site Conditions	Rock or Stiff Soil Sites, $V_s > 180$ m/s
Site-Source Distance	Far-Field (R) > 10 km
Number of Records per Event	No more than 2 records
Strongest Records	PGA > 0.2 g and PGV > 15 cm/sec

Table 3. Characteristic of earthquake records used in this study

Far field Ground Motions			
Earthquake	Component	Magnitude	PGA(g)
Northridge-01(1994)	MUL279	6.7	0.42
Northridge-01(1994)	LOS000	6.7	0.41
Duzce, Turkey(1999)	BOL090	7.1	0.73
Hector Mine(1999)	HEC000	7.1	0.25
Imperial Valley(1979)	H-E11230	6.5	0.36
Kobe, Japan(1995)	NIS000	6.9	0.51
Kobe, Japan(1995)	SHI000	6.9	0.24
Kocaeli, Turkey(1999)	DZC180	7.5	0.32
Kocaeli, Turkey(1999)	ARC000	7.5	0.22
Landers(1992)	YER270	7.3	0.25
Landers(1992)	CLW-LN	7.3	0.28
Loma prieta(1989)	CAP000	6.9	0.53
Loma prieta(1989)	GO3000	6.9	0.56
Superstition Hills(1987)	B-ICC000	6.5	0.36
Superstition Hills(1987)	B-POE270	6.5	0.45
Cape Mendocino(1992)	RIO270	7	0.39
Chi-Chi, Taiwan(1999)	TCU045-N	7.6	0.47
San Fernando(1971)	PEL090	6.6	0.21
Friuli, Italy(1976)	TMZ000	6.5	0.35

3.3 입력지진의 특성

FEMA P-695 보고서 [10]에서 언급된 원거리 지진파를 입력지진으로 사용하였으며 지진파의 선정에 사용한 기준은 Table 2에 나타내었고, 선정된 19개의 지진가속도에 대한 기록성분, 규모, 최대지반가속도는 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타낸 19개의 입력지진에 대한 가속도 및 변위 응답스펙트럼을 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다.

4. 면진된 원전구조물의 강성중심과 질량중심 불일치에 따른 지진응답분석

4.1 면진장치의 강성중심과 상부구조물의 질량중심의 불일치에 따른 편심효과

원전구조물에 설치되는 면진장치의 숫자는 일반적으로 수백 개에 달한다. 수백 개에 달하는 면진장치의 배치조건에 따라서 면진장치들의 횡방향 강성의 중심위치는 원전 구조물의 질량의 중심위치와 동일하지 않을 가능성이 높다. 이러한 면진장치들의 강성중심과 질량중심의 불일치의 정도를 편심으로 정의할 수 있고 편심이 증가할수록 면진된 원전구조물의 지진에

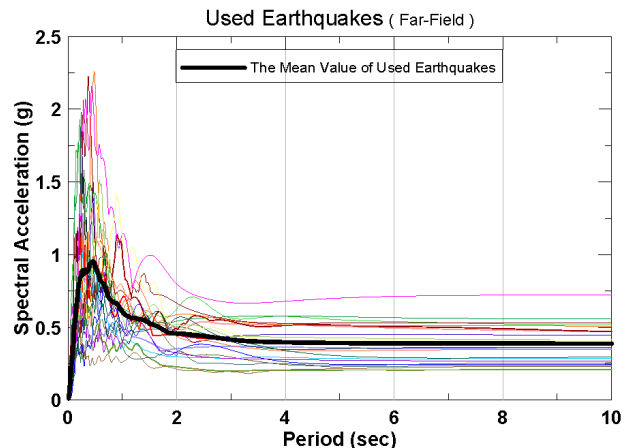


Fig. 6. Spectral acceleration of input ground motions

의한 수평방향 거동은 비틀림의 영향이 증가하게 되어 원전구조물의 안전성을 저해하는 요인이 될 수 있다. 본 연구에 사용한 면진장치의 배치는 하부 원형 매트에 따라서 균일하게 배치하여 면진장치의 개별적인 횡방향 강성이 동일하다면 강성중심은 원형매트의 도심에 위치하여, 질량중심이 하부매트의 도심에 가깝게 위치한다면 편심의 영향은 거의 없을 것이다. 면진장치의 강성중심과 질량중심의 차이인 편심율에 따른 횡방향 거동을 분석하기 위하여 본 연구에서는 강성중심의 위치 변화를 이상적인 형태로 가정

하여 고려하였다. 면진장치는 강성중심의 위치변화는 면진장치 생산 시 품질 관리에 따른 개별 강성차이 및 시간의 경과에 따른 강성변화에 따라 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 강성중심의 변동에 따른 편심효과를 분석하기 위하여 세 가지 종류의 편심모델을 가정하여 해석에 사용하여 면진된 원전구조물의 응답변화를 비교 분석하였다. 원점으로부터 x_i, y_i 가 되는 거리에 면진장치 강성 K_1, K_2, K_3, K_4 를 갖는 간단한 면진된 구조물의 예가 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다고 한다면 원점으로부터 강성중심(CR)까지 거리 X_R, Y_R 은 식 (9)로부터 구할 수 있다. 강성중심(CR)과 질량중심(CG)의 차이를 편심(e_x, e_y)으로 정의하고 이를 편심율로 정의할 수 있다.

$$X_R = \frac{\sum(K_i x_i)}{\sum K_i}, Y_R = \frac{\sum(K_i y_i)}{\sum K_i} \quad (9)$$

면진된 원전 구조물의 허용 편심이 규정되어 있지는 않지만 국내 건설관련 시방서 및 ACI(American Concrete Institute)에서는 일반 구조물의 경우 허용 편심을 2% 또는 50 mm 이내로 규정하고 있다. 본 논문은 강성중심의 이동에 따른 편심효과를 분석하기 위하여 이러한 허용편심보다 과도한 5, 10, 15%의 편심이 발생하는 경우를 가정하였다. 면진된 원전구조물의 질량중심과 면진장치의 강성중심의 차이에 의한 임의의 편심의 유발은 강성중심의 이동을 통하여 달성하였다. 강성중심의 이동은 면진장치의 강성을 증가시키거나 감소시키는 방법을 사용하였으며, 세 가지 대표적인 편심 적용 모델을 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 설정하여 해석에 사용하였다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 Case 1은 전체 면진장치 중에 절반에 가까운 부분의 면진장치들의 강성저하를 유도하여 강성의 중심을 편향시킨 모델이고 Case 2는 반대로 절반에 가까운 부분의 면진장치들의 강성을 부분적으로 증가시켜 편심을 유도한 모델이다. Case 3은 면진장치의 강성을 한쪽은 부분적으로 저하시키고 반대편은 증가시켜 편심을 유도한 모델이다. Case 3모델은 36개의 면진장치의 강성 합이 편심 증가 이전의 합과 같으므로 편심 증가에 따른 주기의 변화가 발생하지 않는다. Case 1은 면진장치의 강성이 합이 감소하였기 때문에 면진된 원전구조물의 고유주기가 증가하는 경우이고, CASE 2의 경우는 반대로 고유주기가 감소하는 경우이다.

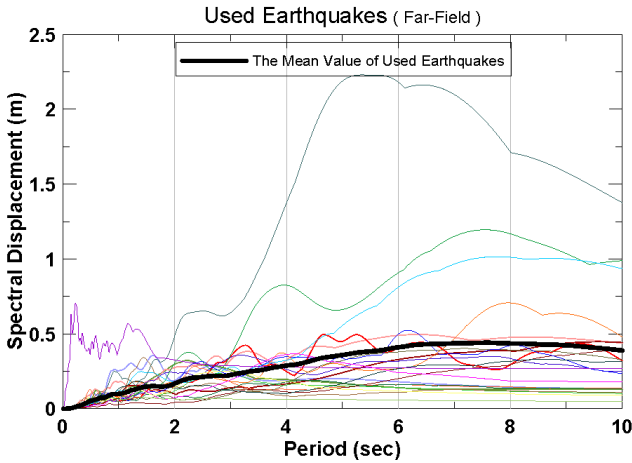


Fig. 7. Spectral displacement of input ground motions

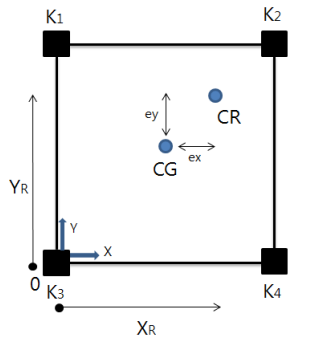


Fig. 8. calculation of center of rigidity

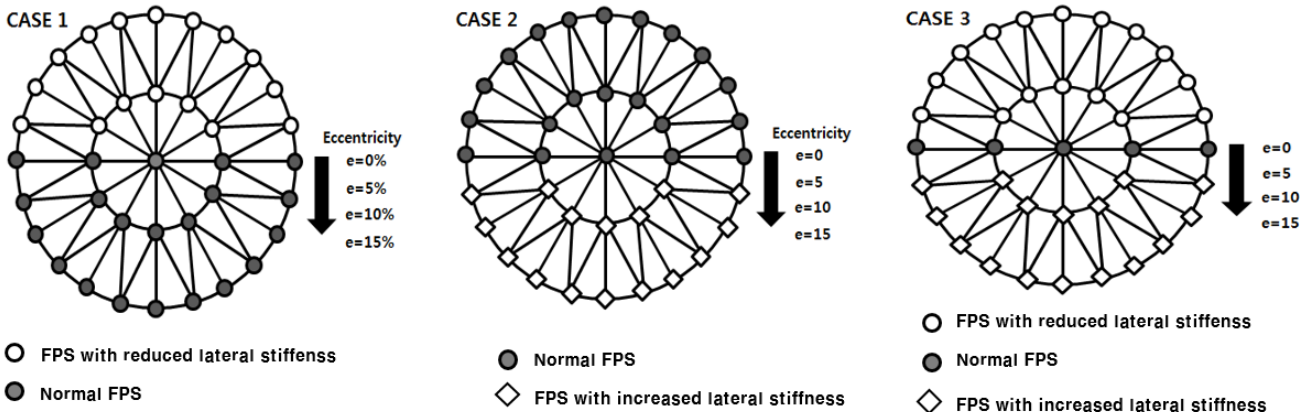


Fig. 9. Three representative cases of eccentricity using partially changed stiffness of FPS

Table 4. Comparison of natural period of nuclear power plant(NPP) structures with or without FPS

Vibration Mode	NPP without FPS		NPP with FPS			
			Equivalent Linear FPS Model		Nonlinear FPS Model	
	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)	Frequency (Hz)	Period (sec)
1	5.7283	0.1745	0.4913	2.0353	1.7711	0.5646
2	7.3908	0.1353	0.4993	2.0026	1.9484	0.5132
3	13.9025	0.0719	1.1612	0.8611	2.6453	0.3780
4	14.8762	0.0672	6.9266	0.1443	7.0374	0.1420
5	22.5258	0.0443	11.4910	0.0870	11.6178	0.0860
6	27.6567	0.0361	14.6152	0.0684	14.6252	0.0683

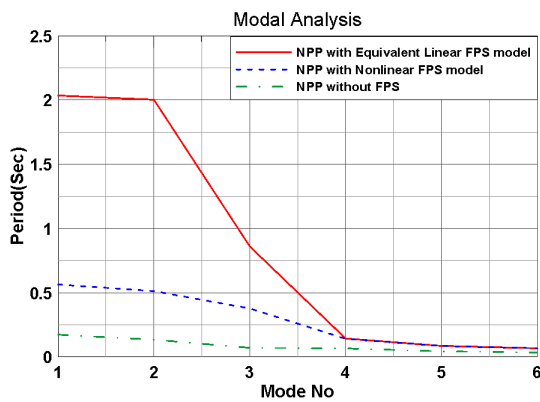


Fig. 10. Comparison of natural periods of NPP structures with or without FPS

4.2 강성중심 변화에 따른 편심영향을 반영한 고유치 해석

면진장치를 등가선형 및 이선형으로 모델링하여 적용한 경우와 면진장치가 설치되지 않은 경우에 대하여 고유치해석을 수행하여 Table 4에 비교하여 나타내었다. 등가선형모델을 적용한 경우에는 설계목표 주기가 2초가 되도록 설계하였기 때문에 2초에 가깝게 주기가 나타남을 알 수 있다. 편심의 영향이 없는 면진시스템에 의해 면진된 원전구조물의 모드별 고유주기를 Fig. 10에 나타내었다. 3차 모드까지가 면진장치의 진동모드이기 때문에 등가선형모델과 이선형 모델을 적용한 경우의 모드별 고유주기의 차이가 나며 4차 모드(면진장치 없는 경우는 1차모드)부터는 원전구조물의 진동모드이기 때문에 동일한 고유주기가 나타난다.

세 가지 편심모델(CASE 1, 2, 3)에 대한 고유주기를 면진장치를 등가선형모델과 이선형모델로 구분하여 Table 5에 비교하여 나타내었다. 편심이 커질수록 CASE 1은 면진장치의 강성의 합이 감소하기 때문에 고유주기가 증가하는 반면, CASE 2는 면진장치의 강성의 합이 증가하기 때문에 고유주기가 감소하는 경향을 볼 수 있으며, CASE 3은 면진장치의 강성의 합의 변화가 없기 때문에 고유주기의 변동이 없는 것을 알 수 있다.

4.3 편심이 없는 경우에 대한 면진된 원전의 지진응답

Table 3에 나타낸 Loma Prieta 지진 GO3000 성분의 가속도 기록을 사

Table 5. Comparison of natural periods according to eccentricity models

Eccentricity	Period of first mode (sec)	
	Equivalent Linear Model	Nonlinear Model
CASE 1 Model		
0%	2.035	0.587
5%	2.186	0.634
10%	2.310	0.689
15%	2.424	0.753
CASE 2 Model		
0%	2.035	0.587
5%	1.923	0.537
10%	1.855	0.521
15%	1.807	0.511
CASE 3 Model		
0%	2.035	0.587
5%	2.035	0.587
10%	2.035	0.587
15%	2.035	0.587

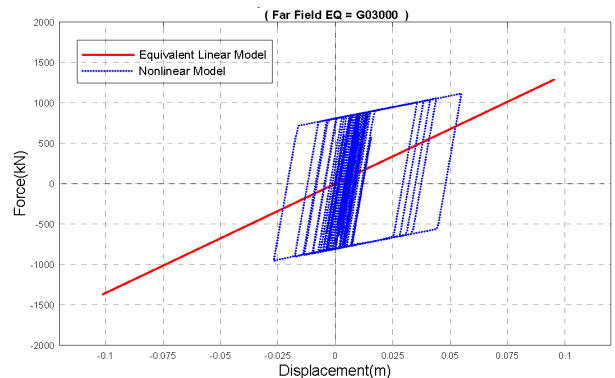


Fig. 11. Comparison of force-displacement relationship by equivalent linear and nonlinear FPS models

용하여 등가선형모델과 이선형모델의 응답이력해석에 의한 힘-변위 관계를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 이 지진성분에 대한 힘-변위 관계는 등가선형모델이 이선형모델에 비해 최대변위를 상대적으로 크게 평가하는 대표적인 사례로 나타난 것이다.

등가선형모델과 이선형모델의 면진장치가 적용된 원전 격납구조물에 대한 변위응답, 가속도응답, 격납구조물의 상층부에서의 층응답스펙트럼을 Table 3에 나타낸 입력지진에 대하여 구한 후 평균을 구하여 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. 면진장치에 의한 지진응답의 저감효과를 비교하기 위하여 면진장치가 설치되지 않은 경우를 함께 비교하여 나타내었다. 격납구조물의 최대변위를 나타낸 Fig. 12(a)로부터 등가선형모델에 의한 면진장치의 변위(약 19 cm)가 이선형 모델의 변위(약 8 cm)에 비하여 약 2배정도 크게 나타남을 알 수 있다. 면진장치가 적용된 경우의 격납구조물의 하층부(높이 6.7 m 지점)와 상층부(높이 70 m 지점)의 변위차이는 0.5 cm 미만으로 나타나고, 면진장치가 없는 경우의 격납구조물의 상대변위는 1.3 cm 정도가 발생함을 알 수 있다. 격납구조물의 안전성에는 상대변위가 직접적

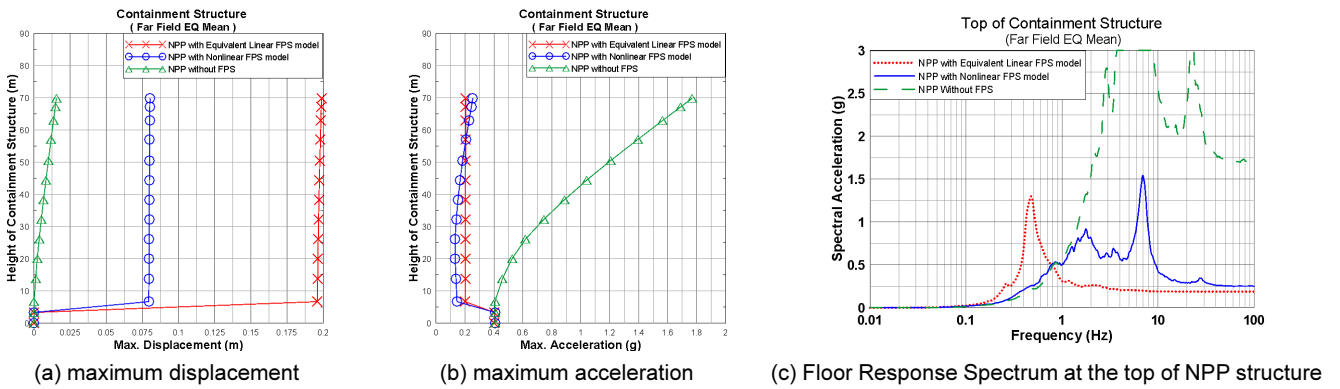


Fig. 12. Comparison of NPP with equivalent linear and nonlinear FPS model

인 영향이 있으므로 면진장치의 적용으로 상대변위를 대략 1/2.6 수준으로 저감시키며 이로 인한 안전성이 상대변위의 관점에서 2.6배 향상되었다고 평가할 수 있다. 격납구조물의 최대가속도를 나타낸 Fig. 12(b)로부터 면진장치에 의해 기초부의 가속도 0.4 g가 면진장치를 통과하면서 0.2 g 이하로 약 50% 수준으로 저감됨을 확인할 수 있다. 면진장치가 없는 경우는 격납구조물 상층부의 최대가속도가 1.8 g 정도로 면진장치 하부의 기초부의 가속도에 비해 약 4.5배 증폭됨을 알 수 있다. 격납구조물 최상층부에 대한 구조물-내부 응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)을 면진장치가 없는 경우, 등가선형모델과 이선형모델의 마찰진자시스템이 적용된 경우에 대하여 Fig. 12(c)에 비교하여 나타내었다. 구조물-내부 응답스펙트럼(FRS)은 원전의 내부설비에 대한 지진응답을 평가할 때 사용되는데, 면진장치가 적용됨으로써 구조물-내부 응답스펙트럼이 현저히 감소됨을 알 수 있고 이로부터 면진장치는 원전내부의 설비의 내진 안전성을 향상시키는데 탁월한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 면진장치가 적용되지 않은 경우에는 2 Hz 이상의 고진동수에 대하여 큰 응답을 보이며 격납구조물의 고유진동수인 약 7 Hz 부근에서 가장 큰 응답을 보였다. 이선형 모델 면진장치가 적용된 경우, 면진장치의 고유진동수인 2Hz 부근과 격납구조물의 고유진동수 7 Hz 부근에서 큰 응답값을 나타낸다. 등가선형모델의 경우에는 고유진동수인 0.5 Hz 부근에서 큰 응답을 가진다. 0.8 Hz 보다 작은 저진동수에서 면진이 적용되지 않은 모델에 비하여 구조물-내부 응답스펙트럼이 크게 나타나는 경향이 있다.

4.4 편심모델 별 지진응답비교

등가선형모델과 이선형모델을 사용한 경우에 대하여 3가지 편심모델을 적용하여 마찰진자시스템의 힘-변위응답을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 편심모델 CASE 1은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 원형 배치된 면진장치 중 약 50%의 면진장치에 대하여 강성을 감소시켜 편심을 유발하였다. 그러므로 면진시스템의 강성의 총합이 작아지면서 면진된 원전구조물의 고유주기가 장주기화가 되어 편심이 증가할수록 변위응답이 증가함을 알 수 있다. 특히, 등가선형모델의 경우가 이선형 모델의 경우보다 편심에 의한 변위응답의 증가가 크게 나타난다. 편심모델 CASE 2는 면진장치의 강성의 합이 편심이 증가할수록 커지기 때문에 고유주기와 변위, 전단력이 편심율의 증가에 따라 반대로 감소하는 것을 알 수 있다. 편심모델 CASE 3는 Fig.

9에 나타낸 바와 같이 절반정도의 면진장치의 강성을 줄이고 다른 절반의 면진장치의 강성은 증가시켜서 편심을 유발하기 때문에 면진장치의 강성의 합이 동일하다. 편심이 증가하더라도 Fig. 13(c)와 Fig. 13(f)의 힘-변위 응답의 차이는 거의 없다. 전반적으로 등가선형모델 보다는 이선형모델의 경우가 편심의 증가에 따른 힘-변위응답의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

편심의 증가에 따른 마찰진자시스템의 양방향 수평변위응답을 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. Table 3에 나타낸 입력지진을 Fig. 5에 나타낸 원전구조물의 X방향으로만 작용시켰기 때문에 편심이 없는 경우는 X방향으로만 변위가 발생하고 Z방향으로만 변위응답이 발생하지 않지만 편심이 있는 경우는 Z방향으로의 변위응답도 발생한다. 등가선형모델의 경우에 편심모델 CASE 1은 편심이 증가할수록 양방향 수평변위가 증가함을 알 수 있다. CASE 2는 편심이 증가할수록 X방향변위(DX)는 약간 감소하지만 Z방향변위(DZ)는 다소 증가하는 특성을 나타내며, CASE 3는 편심이 증가할수록 X방향변위(DX)는 거의 동일하지만 Z방향변위(DZ)는 다소 증가하는 특성을 나타낸다. 이선형모델의 경우가 등가선형모델에 비하여 Z방향변위(DZ)가 크게 발생함을 알 수 있다.

세 가지 편심모델을 사용하여 편심의 증가에 따른 격납구조물의 수평변위응답을 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 마찰진자시스템을 등가선형모델로 모델링한 경우의 변위응답 비교를 Fig. 15 (a), (b), (c)에 나타내었고 이선형모델로 모델링한 경우의 변위응답 비교를 Fig. 15 (d), (e), (f)에 나타내었다. 마찰진자시스템을 등가선형모델로 모델링한 경우의 격납구조물의 최대변위응답이 이선형모델을 적용한 경우에 비하여 약 2배정도 크게 평가함을 알 수 있다. 등가선형모델을 사용한 Fig. 15 (a), (b), (c)의 결과로부터 CASE 1 모델은 편심이 작용할수록 변위가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, CASE 2 모델과 CASE 3 모델의 경우에는 편심에 증가에 따라 변위가 감소하는 경향을 나타낸다. Case 1은 편심이 증가할수록 면진장치의 강성을 감소시키고 Case 2는 반대로 면진장치의 강성을 증가시켰기 때문에 이러한 변위응답의 결과가 나타나는 것은 당연하다. Case 3의 경우는 면진장치의 강성을 절반정도는 줄이고 절반정도는 증가시키는 방법으로 편심을 증가시켰기 때문에 모든 면진장치에 대한 강성의 총합은 일정하지만 변위응답에는 증가한 강성을 가진 면진장치의 거동이 보다 지배적이어서 변위답이 Case 2의 경우와 유사하게 나타난다고 판단된다. 이선형모델을 사용한 Fig. 15 (d), (e), (f)의 결과로부터 편심에 따른 변위응답의 영향이 등가선형모델에 비하여 현저히 작아짐을 확인할 수 있다. 이선형모델

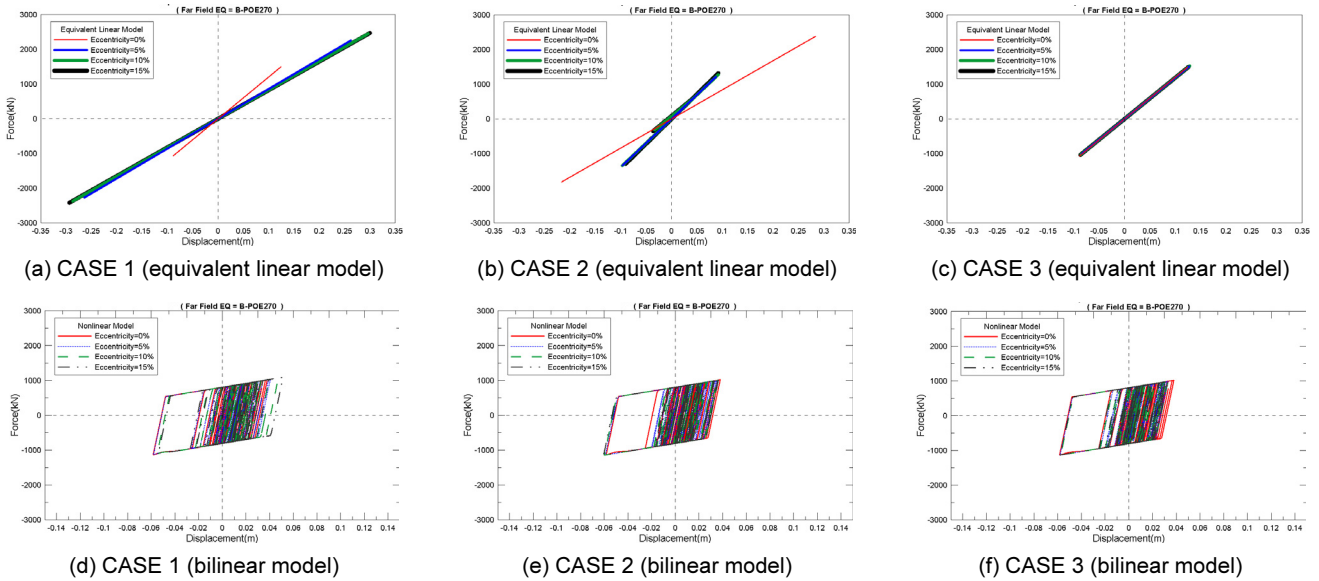


Fig. 13. Comparison of force-displacement relationship for equivalent linear and nonlinear FPS models corresponding to several eccentricity cases

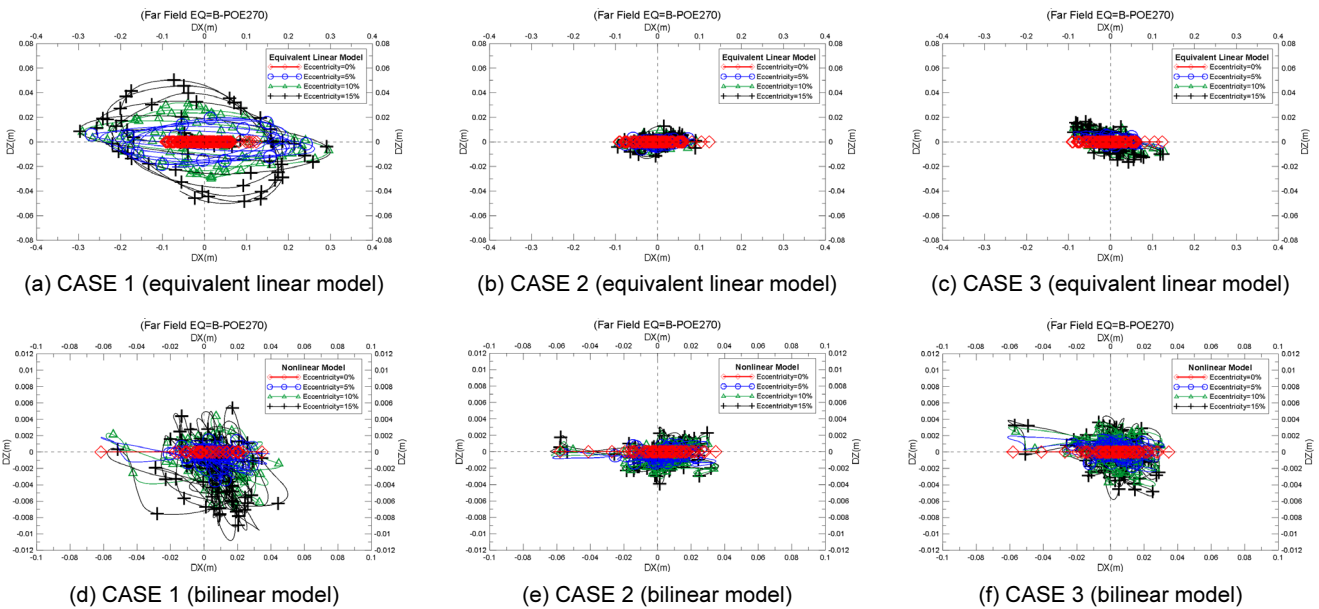


Fig. 14. Comparison of bi-directional displacement responses (DX-DZ) for equivalent linear and nonlinear FPS corresponding to several eccentricity cases

의 적용시에 편심에 따른 강성의 크기를 1차강성(K_u)의 크기로서 조절하지만 2차강성(K_d)과 항복력은 동일한 값을 사용하였기 때문에 이선형 거동 이후에는 편심의 영향이 크게 작용하지 않기 때문에 판단된다.

세 가지 편심모델을 사용하여 편심의 증가에 따른 격납구조물의 수평가속도응답을 비교하여 Fig. 16에 나타내었다. 마찰진자시스템을 등가선형 모델로 모델링한 경우의 가속도응답 비교를 Fig. 16 (a), (b), (c)에 나타내었고 이선형모델로 모델링한 경우의 가속도응답 비교를 Fig. 16 (d), (e), (f)에 나타내었다. 마찰진자시스템에 의하며 면진장치 기초부의 가속도(평균 0.4 g)가 면진장치 상층부로 가면서 약 0.2 g 이하로 줄어든다. 특히 이선형 모델을 적용한 경우가 등가선형모델을 적용한 경우에 비하여 가속도 저감

정도가 크게 나타난다. 이는 이선형모델의 경우에 비탄성 거동에 따른 면진 장치의 항복후 2차강성이 1차강성에 비하여 100배 정도로 작으므로 상부 구조물로의 가속도 전달정도가 작기 때문으로 판단된다. 등가선형모델을 사용한 Fig. 16 (a), (b), (c)의 결과로부터 CASE 1 모델은 편심이 증가할수록 가속도가 감소하는 것을 나타내며, CASE 2 모델은 편심에 증가에 따라 가속도가 증가하는 경향을 나타낸다. 면진장치의 강성이 감소하면 가속도가 감소하고 반대의 경우에는 증가하는 경향을 나타낸다. Case 3의 경우의 가속도응답이 Case 1의 경우와 비슷하게 나타나며 이는 가속도 응답은 강성이 줄어드는 면진장치의 거동이 지배적임을 의미한다. 이선형모델을 사용한 Fig. 16 (d), (e), (f)의 결과로부터 편심에 증가에 따른 가속도응답의

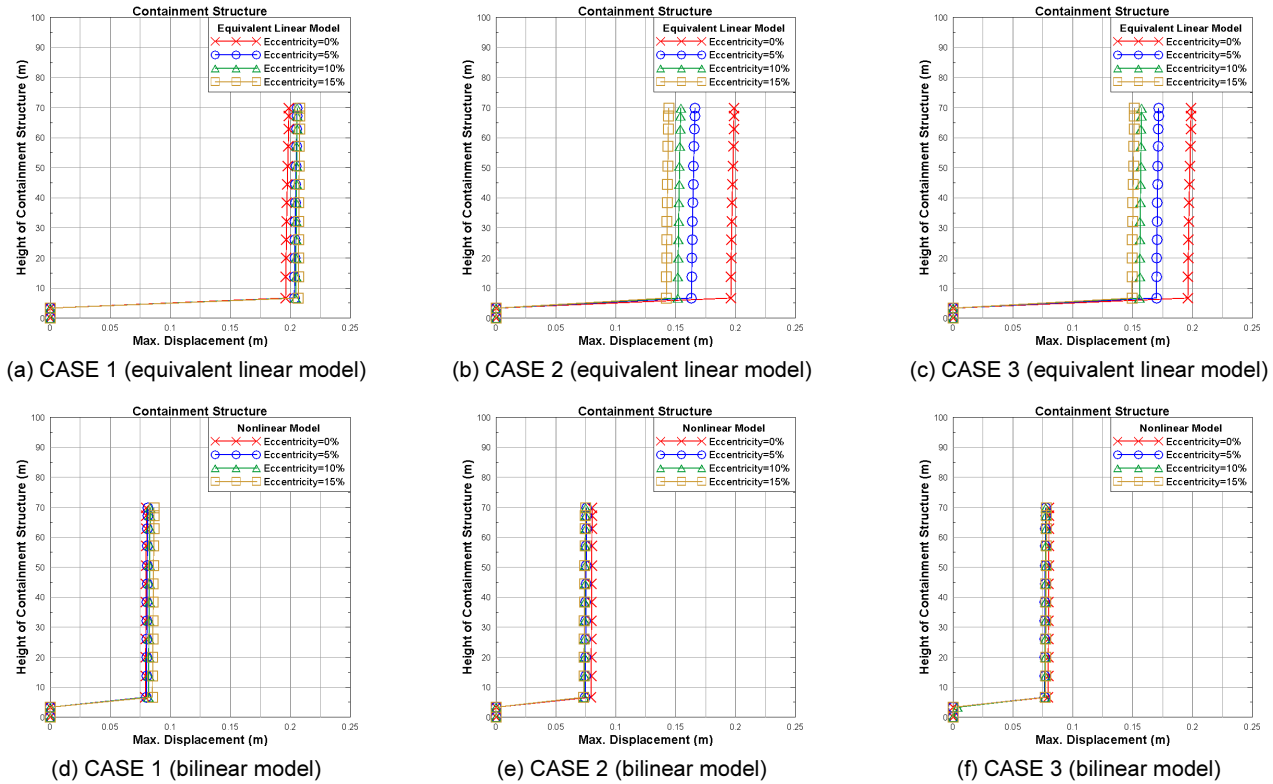


Fig. 15. Comparison of maximum displacement of seismically isolated containment structure by equivalent linear and nonlinear FPS models corresponding to several eccentricity cases

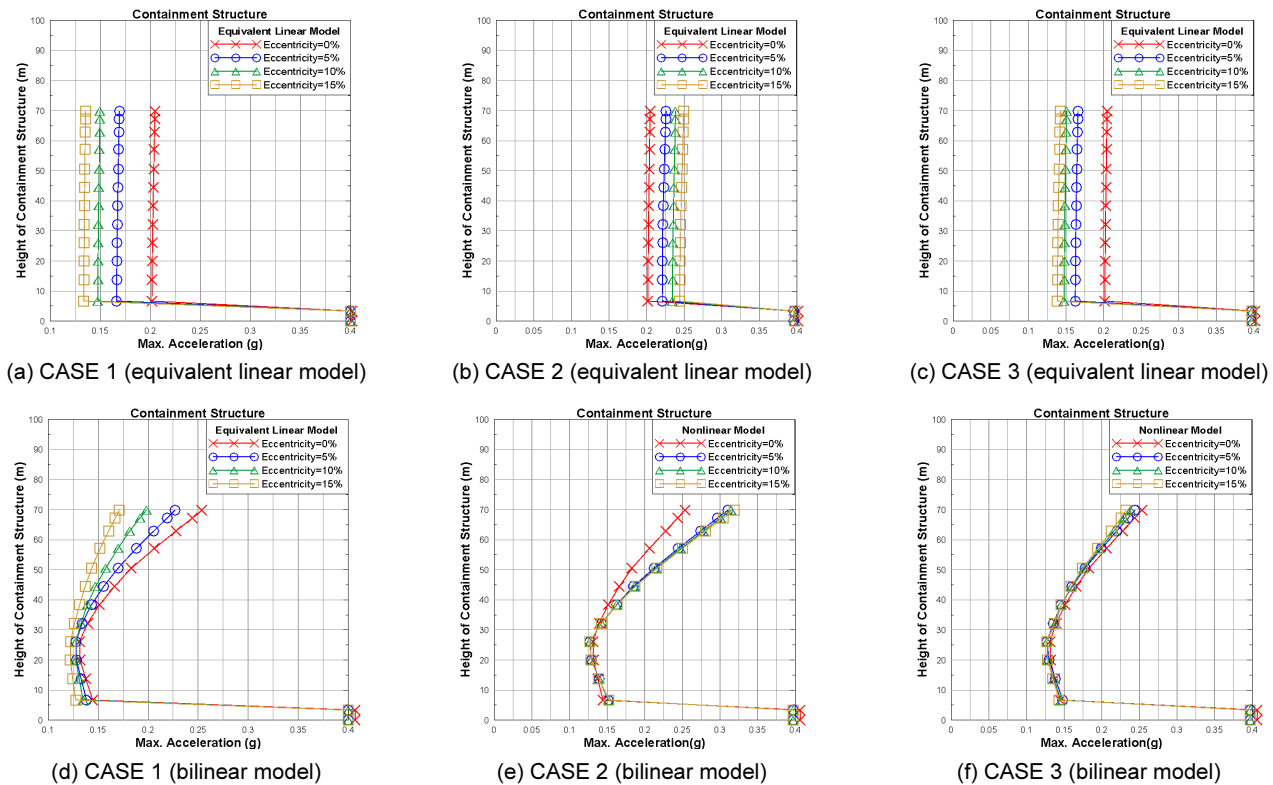


Fig. 16. Comparison of maximum acceleration of seismically isolated containment structure by equivalent linear and nonlinear FPS models corresponding to several eccentricity cases

영향이 등가선형모델에 비하여 크지 않음을 확인할 수 있다. 특히 격납구조물의 하층부일수록 편심에 따른 가속도 차이는 작아진다. 그러나 격납구조물의 상층부로 갈수록 편심에 따른 가속도의 차이는 증가하는데 이는 이선형 모델을 적용하는 경우에 격납구조물의 거동에 고차진동모드의 영향이 증가되기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 마찰진자시스템에 의해 면진된 원전 구조물의 지진해석을 마찰진자시스템을 등가선형모델과 이선형모델로 모형화하여 적용한 경우에 대하여 수행하였다. 면진된 원전구조물의 질량중심과 면진장치의 강성중심의 차이에 따른 편심효과를 분석하기 위하여, 전체 면진시스템의 강성을 부분적으로 변화시켜 강성중심에 편향을 줌으로써, 각각 5%, 10%, 15%로 편심을 유발하고 면진된 원전 구조물의 구조응답 변화를 분석하였다. 편심 모델의 방법으로는 강성을 편향적으로 저하시켜 고유주기가 증가를 유도하는 방법(CASE 1), 강성을 편향적으로 증가시켜 고유주기를 감소시키는 방법(CASE 2), 편향적으로 강성의 저하 증가를 유도하여 고유주기가 동일화되는 방법(CASE 3)을 사용하였으며, 편심에 따른 지진해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 마찰진자시스템에 의한 지진응답의 저감효과를 비교하기 위하여 면진장치가 적용되지 않은 경우와 마찰진자시스템에 의한 면진된 경우의 변위응답 비교로부터, 등가선형모델에 의한 면진장치의 변위(약 19 cm)가 이선형 모델의 변위(약 8 cm)에 비하여 약 2배정도 크게 나타남을 알 수 있다. 마찰진자시스템에 의한 면진된 경우의 격납구조물의 하층부(6.7 m)와 상층부(70 m)의 변위차이는 0.5 cm 미만으로 나타나고, 면진장치가 없는 경우의 상대변위는 1.3 cm 정도가 발생함을 알 수 있다. 격납구조물의 안전성에는 상대변위가 직접적인 영향이 있으므로 면진장치의 적용으로 상대변위를 대략 1/2.6 수준으로 저감시키며 이로 인한 안전성이 상대변위의 관점에서 2.6배 향상되었다고 평가할 수 있다.
- 2) 격납구조물의 최대가속도응답의 비교로부터 마찰진자시스템에 의해 기초부의 가속도 0.4 g가 마찰진자시스템을 통과하면서 0.2 g 이하로 약 50% 수준으로 저감됨을 확인할 수 있다. 면진장치가 없는 경우는 격납구조물 상층부의 최대가속도가 1.8 g 정도로 면진장치 하부의 기초부의 가속도에 비해 약 4.5배 증폭됨을 알 수 있다.
- 3) 마찰진자시스템이 적용됨으로써 구조물-내부 응답스펙트럼이 현저히 감소됨을 알 수 있고 이로부터 마찰진자시스템은 원전내부의 설비의 내진 안전성을 향상시키는데 탁월한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 면진장치가 적용되지 않은 경우에는 2 Hz 이상의 고진동수에 대하여 큰 응답을 보이며 격납구조물의 고유진동수인 약 7 Hz 부근에서 가장 큰 응답을 보였다. 이선형 모델 마찰진자시스템이 적용된 경우, 마찰진자시스템의 고유진동수인 2 Hz 부근과 격납구조물의 고유진동수 7 Hz 부근에서 큰 응답값을 나타낸다. 등가선형모델의 경우에는 고유진동수인 0.5 Hz 부근에서 큰 응답을 가진다. 0.8 Hz 보다 작은 저진동수에서 비면진된 모델에 비하여 구조물-내부 응답스펙트럼이 크게 나타나는 경향이 있다.
- 4) 면진장치의 강성을 편향적으로 저하시켜 원전의 질량중심과 면진시스

- 템의 강성중심의 차이인 편심의 증가를 유도하는 방법(CASE 1)을 분석한 결과, 편심이 증가할수록 고유주기와 변위응답이 증가하며 가속도 응답은 감소한다. 그 이유는 편심증가에 따른 면진시스템의 강성의 총합이 감소로 인하여 변위가 증가하고, 편심이 증가할수록 주기가 증가하고 주기의 증가에 의해 가속도의 응답이 감소하는 것으로 판단된다.
- 5) 면진장치의 강성을 편향적으로 증가시켜 편심을 증가시키는 방법(CASE2)을 분석할 결과로부터 편심이 증가할수록 변위응답이 감소하고 가속도응답은 증가하는 경향을 나타낸다.
 - 6) 면진장치의 강성의 저하 증가를 편향적으로 유도하여 주기가 동일화되는 방법(CASE 3)을 분석한 결과로부터 편심의 증가에 따라 구조물의 고유주기가 동일할 지라도 변위응답과 가속도응답은 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 차이는 등가선형모델을 사용할 경우에는 의미 있는 차이가 나타나지만 이선형 모델을 사용하는 경우에는 편심의 증가에 따른 변위와 가속도 응답의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

/ 감사의 글 /

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

/ REFERENCES /

1. Korea Electric Power Industry Code, STC Seismic isolation design, Korea Electric Association, forthcoming.
2. Huang YN, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL. Assessment of base-isolated nuclear structures for design and beyond-design basis earthquake shaking. Technical Report MCEER-09-0008, MCEER, State University of New York, Buffalo, NY, c2009.
3. Mosqueda G, Whittaker AS, Fenves GL, Mahin SA. Experimental and analytical studies of the friction pendulum system for the seismic protection of simple bridges. UCB/EERC 2004-01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, c2004.
4. Fenz DM, Constantinou MC. Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings. MCEER-08-0007. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY, c2008.
5. Fenz DM, Constantinou MC. Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings. MCEER-08-0018, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY, c2008.
6. Jeon BG, Chang SJ, Kim NS. Seismic performance evaluation of cone-type friction pendulum bearing system using shaking table test. Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. 2011;21(7):599-608.
7. Kim KI, Han WJ, Choi SH, Kim MS, Cho SK, Joe YH. Vibration reduction characteristics of a mechanical piping support device based on friction pendulum principle. J. Korean Soc. Hazard Mitig.

- 2016;16(6):319–324.
8. Fenz DM, Constantinou MC. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008;37(2):185–205.
 9. Fenz DM, Constantinou MC. Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008;37(2):163–183.
 10. Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors (FEMA P695). ATC-63 Project, Redwood city, California, c2009.
 11. American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide Specification for Seismic Isolation Design, AASHTO, Washington, D.C. c2010.
 12. FEMA. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273) and NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 274). Washington (DC): Building Seismic Safety Council. c1997.
 13. American Society of Civil Engineers. ASCE 7-10; Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. ASCE, Reston, c2010.
 14. Mayes RL, Naeim F. The seismic design handbook 2nd edition, Ch,14 design of structures with seismic isolation, pp. 725–755. Kluwer Academic Publishers, c2001.
 15. Naeim F, Kelly JM. Design of seismic isolated structures. John Wiley & Sons. c1999.
 16. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC. A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley, c1999.
 17. 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.
 18. Wu SC, Yang SM. Dynamics of Mechanical Systems with Coulomb Friction, Stiction, Impact and Constraint Addition-Deletion-II: Planar Systems, Mechanism and Machine Theory. Vol. 21, 1986.