한국지진공학회 논문집 23권 2호 (통권 제128호)
2019년 3월

ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099
EESK J Earthquake Eng Vol. 23 No. 2, 89-99
https://doi.org/10.5000/EESK.2019.23.2.089

최대-최소 스펙트럼에 대응하는 인공합성지진에 대한 면진된 원전구조물의 지진취약도 곡선 평가

Evaluation of Seismic Fragility Curve of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures for Artificial Synthetic Earthquakes Corresponding to Maximum-Minimum Spectrum

김현정[1] · 송종걸[2]*

Kim, Hyeon-Jeong[1] · Song, Jong-Keol[2]*

[1]강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학전공 석사졸업, [2]강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학전공 교수

[1]Master of Science, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, [2]Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ ABSTRACT /

In order to increase the seismic safety of nuclear power plant (NPP) structures, a technique to reduce the seismic load transmitted to the NPP structure by using a seismic isolation device such as a lead-rubber bearing has recently been actively researched. In seismic design of NPP structures, three directional (two horizontal and one vertical directions) artificial synthetic earthquakes (G0 group) corresponding to the standard design spectrum are generally used. In this study, seismic analysis was performed by using three directional artificial synthetic earthquakes (M0 group) corresponding to the maximum-minimum spectrum reflecting uncertainty of incident direction of earthquake load. The design basis earthquake (DBE) and the beyond design basis earthquakes (BDBEs are equal to 150%, 167%, and 200% DBE) of G0 and M0 earthquake groups were respectively generated for 30 sets and used for the seismic analysis. The purpose of this study is to compare seismic responses and seismic fragility curves of seismically isolated NPP structures subjected to DBE and BDBE. From the seismic fragility curves, the probability of failure of the seismic isolation system when the peak ground acceleration (PGA) is 0.5 g is about 5% for the M0 earthquake group and about 3% for the G0 earthquake group.

Key words: Lead-rubber bearing (LRB), Seismic fragility curve, Beyond design basis earthquake, Maximum-minimum spectrum

1. 서 론

지진재해는 구조물의 손상인 1차적인 피해뿐만 아니라 사회적, 경제적인 2차적인 피해를 유발하는 재해이다. 우리나라의 경우 지진발생횟수와 규모 3.0 이상의 지진횟수가 꾸준히 증가하는 추세이며, 규모 5.0 이상의 강진이 빈번하게 발생하지는 않았지만 최근 규모 5.8의 경주지진과 규모 5.4의 포항지진으로 인하여 앞으로 강진이 발생할 확률이 증가하고 있는 추세이다. 특히 원자력발전소(이하 원전) 인근에 발생한 경주와 포항지진으로 인해 원전의 안전성에 대한 국민들의 관심이 증가하고 있으며 국가적으로 원전의 지진 안전성을 확보하기 노력이 필요하며 강진으로부터 원전의 안전성을 확보하는 방안에 대한 연구가 중장기적으로 꾸준히 진행되어야 한다고 판단된다. 원전의 강진에 대한 안전성을 향상시키는 방법 중에서 현재 면진장치의 적용이 가장 많이 고려되고 있는 방안이다. 국내에서는 최근에 원전에 면진을 적용하여 최대지반가속도 0.5 g를 구조물에 전달되는 지진가속도는 0.3 g로 저감시키는 연구가 활발히 진행되어 왔다.

지진가속도 기록은 수평방향 2방향과 수직방향에 대하여 3방향의 가속도 기록을 계측한다. 그러나 실제적인 구조물의 지진해석에서 수평방향 1방향에 대한 해석위주로 대부분의 연구가 진행되어 온 것이 현실이다. 내진설계 목적의 지진해석을 위해서는 설계스펙트럼에 대응하는 인공합성지진을 생성하여 사용하는데 이 경우에도 수평방향 한 방향에 대한 지진가속도 기록을 이용한 해석을 사용하는 것이 일반적이었지만 원자력발전소와 같은 중요 구조물에 대해서는 3방향 지진가속도 기록을 동시에 적용한 지진

*Corresponding author: Song, Jong-Keol
E-mail: songj@kangwon.ac.kr
(Received August 6, 2018; Revised December 27, 2018; Accepted December 27, 2018)

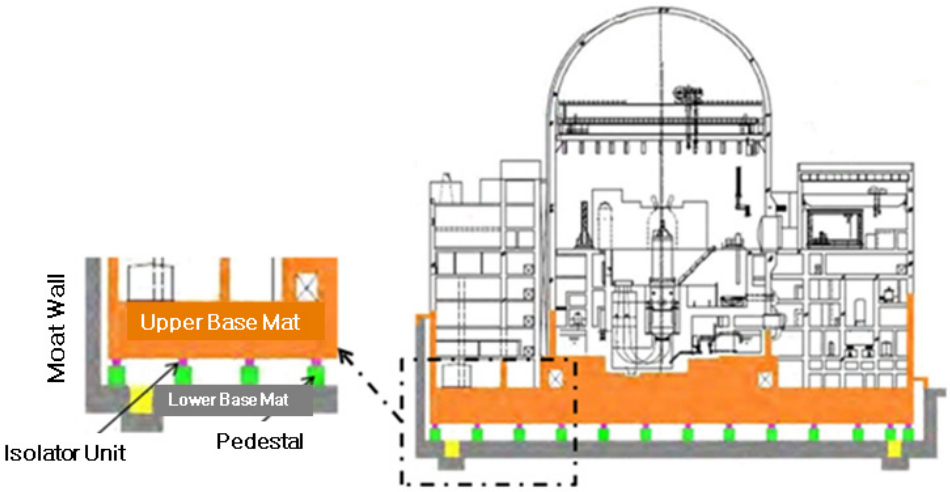


Fig 1. Typical model of seismically isolated nuclear power plant

해석이 실제적인 지진응답을 모사하는데 보다 적합하므로 3차원 지진해석의 필요성이 증대되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 3차원 지진기록을 사용하여 면진된 원전구조물의 지진응답을 해석하는데 있어서 구조물에 대한 지진의 입사방향성의 영향을 반영한 면진된 원전구조물의 지진취약도 해석이 주된 연구 목적이다.

지진하중의 입사방향성과 관련하여 NGA 강진 데이타베이스[1]로부터 선택된 147쌍의 지진기록에 대하여 단층-법선방향, 단층-평행방향, 기하학적 평균(geometric-mean)과 최대 스펙트럼 요구도(maximum spectral demand)등이 근거리 지진에 대하여 연구되었다[2]. 실제 지진파의 구조물에 대한 입사방향에 따라 구조물의 지진응답이 차이가 날 수 있으므로 입사방향에 최대 응답이 발생하는 입사각을 구하는 이 축을 최대응답의 축이고 이와 직교를 이루는 축이 최소응답을 이루는 축을 나타낸다. 최대 스펙트럼 요구도는 2자유도계의 가속도 응답 해석으로부터 최대 가속도가 발생하는 입사각의 최대축에 대한 최대응답을 구하는데 이는 구조물의 주기마다 다르므로 구조물의 주기에 대한 함수로서 최대 스펙트럼이 발생하는 축에 대한 스펙트럼 응답을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 원자력발전소 구조물의 설계를 위해 사용하는 표준설계 스펙트럼에 대응하는 30개 세트(수평 2방향, 수직 1방향의 지진이 1세트)의 인공합성 지진가속도 기록을 생성하여 G0 지진그룹이라 하였고, 지진의 입사각에 따른 방향성을 반영하기 위해 최대-최소 스펙트럼에 대응하는 인공지진 30개 세트를 생성하여 M0 지진그룹이라 하였다. G0 지진그룹과 M0 지진그룹에 대한 면진된 원전구조물의 다양한 지진응답을 비교하여 지진가속도 기록의 입사방향에 따른 응답의 차이를 비교하여 분석하였다. 설계기준지진(design basis earthquake, DBE)의 최대지반가속도는 0.5 g가 되도록 표준설계 스펙트럼을 작성하여 사용하였고, 지진취약도 곡선의 작성을 위해서는 이 보다 큰 세기의 지진하중이 해석에 필요하므로 설계초과지진(beyond design basis earthqauke, BDBE)[3]으로는 150%, 167%, 200% DBE를 적용하였다. 또한 면진된 원전구조물의 비탄성 지진응답은 면진장치가 부담하게 되므로 손상의 대부분은 면진장치에 발생하기 때문에 G0 지진그룹과 M0 지진그룹에 대한 지진취약도 해석을 수행하여 면진장치의 손상확률을 비교, 분석하였다.

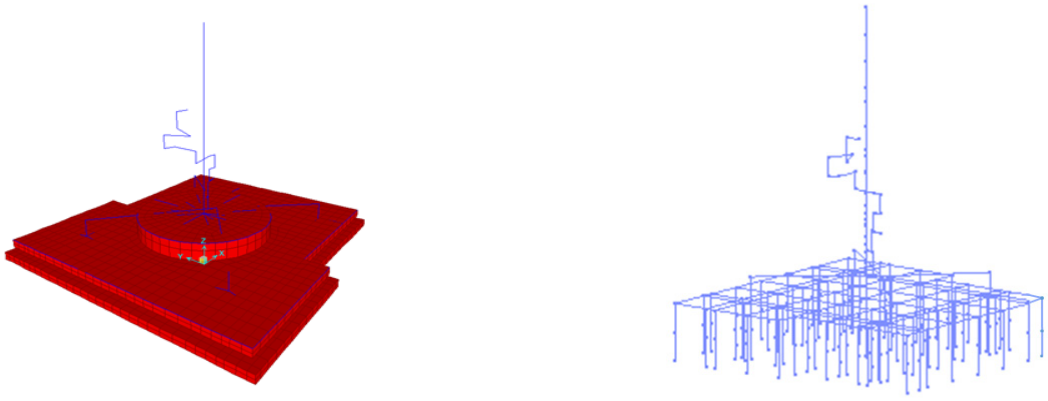
2. 면진된 원전구조물의 지진해석모델

2.1 원전구조물 모델링

납-고무 받침과 같은 면진장치에 의해 면진된 원전구조물의 전형적인 형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 면진장치는 원전구조물을 지지하는 상부밑면매트와 기초부를 지지하는 하부밑면매트 사이에 위치하며 면진장치의 횡방향 거동의 유연성을 통하여 상부구조물로 전달되는 지진하중을 감소시키는 역할을 한다. 본 논문에 사용된 원전구조물의 상부구조물은 격납구조물과 내부구조물, 보조구조물로 구분되어있다. 격납구조물의 높이는 84.201 m, 내부구조물의 높이는 41.453 m이다. 상부밑면매트, 면진장치, 하부밑면매트를 포함한 면진층의 두께는 16.764 m이다. Fig. 1에 나타낸 실규모의 원전구조물을 beam-stick 모델을 이용하여 간략화된 모델로 전환하여 Fig. 2에 나타내었다. 상부구조물을 나타내는 beam-stick 요소가 많은 관계로 해석에 많은 노력이 소요되므로 이를 등가의 축소된 개수의 beam-stick으로 전환한 모델이 Fig. 2(a)에 나타낸 간략화된 beam-stick 모델이다. 간략화된 beam-stick 모델의 정확성은 SAP2000 프로그램을 사용한 고유치해석의 진동수와 진동모드의 비교를 통하여 확인하였다. Fig. 2(a)에 나타낸 간략화된 beam-stick 모델을 OpenSEES 프로그램[4] 사용할 수 있도록 전환한 모델을 Fig. 2(b)에 나타내었다. OpenSEES 프로그램을 이용한 경우에 대한 구조해석모델의 정확성을 확인하는 과정도 고유치해석결과를 SAP2000을 이용한 고유치 해석결과와 비교하여 확인하였으며 두 프로그램에서 동일한 결과를 얻었다.

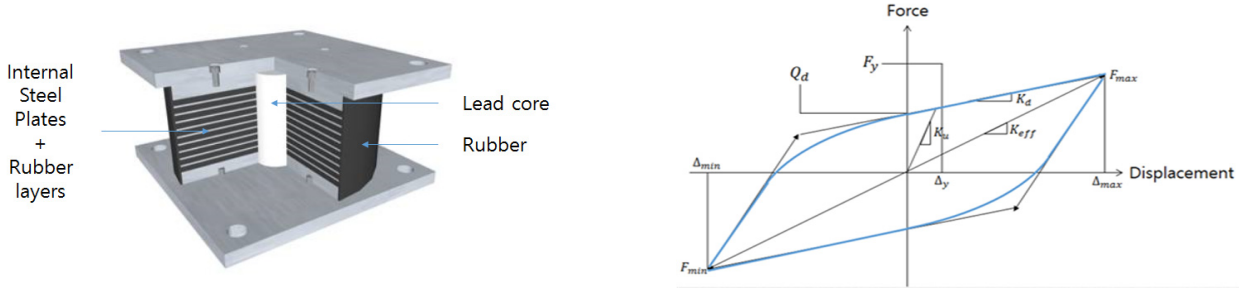
2.2 면진장치 모델링

면진장치를 이용한 면진적용의 개념은 지반과 구조물 사이에 유연한 횡방향 강성을 가진 전단변형 장치를 설치하여 지반과 구조물을 분리시키는 방법으로 구조물의 고유주기를 장주기화하여 구조물에 전달되는 지진가속도의 크기를 감소시키며 면진장치가 대부분의 지진에너지를 소산시켜 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 저감시키는 원리이다. 대표적인 면진



(a) simplified beam-stick model (SAP2000)　　(b) analytical model by OpenSEES

Fig. 2. Analytical modeling of seismically isolated nuclear power plant



(a) Configuration of LRB　　(b) analytical model for LRB

Fig. 3. Lead Rubber Bearing

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

Model	Parameter	Value
Bi-Linear LRB Model	K_u (elastic stiffness)	$3.191\times10^6\ kN/m$
	K_d (second-slope stiffness)	$2.494\times10^4\ kN/m$
	Q_d (characteristic strength)	$5.865\times10^3\ kN$
	F_y (yield strength)	$5.911\times10^3\ kN$

장치의 예로는 납-고무받침, 마찰진자시스템(friction pendulum system), EQS(eradi quake system) 등이 있다. 본 연구에 사용된 면진장치는Fig. 3에 나타낸 바와 같이 납-고무받침으로 현재까지 원전구조물의 면진에 가장 많이 적용하고 있다. 납-고무받침은 얇은 두께의 고무층과 철판을 교대로 겹쳐놓은 적층모양에 중심부에 납심이 있는 형태로 수직강성은 크고 수평강성은 작아서 횡방향으로 유연한 특성이 있다. 고무의 유연성으로 지진력을 감소시키고, 납의 소성거동을 통해 지진에너지를 소산시킨다. 면진 원전구조물에서 면진장치는 상부구조물의 밑면매트와 하부구조물의 받침대 사이에 설치한다.

원전구조물의 자중이 크기 때문에 이를 지지하는 면진장치의 개수는 일반적으로 수백 개에 달한다. 본 연구에 사용한 원전구조물의 면진을 위하여 설계된 면진장치가 486개가 필요하지만 해석의 효율성을 높이기 위하여 이를 83개로 줄여서 적용하였다. 면진장치는 고유주기가 2초가 되도록 설계하였다. 개수가 축소된 등가 면진장치의 강성은 실제 면진장치의 약 5.855배 정도가 되도록 해석모델의 물성치를 산정하였고, 간략화된 83개의 면진장치 중 하나의 물성치 값은 Table 1과 같다. 면진장치를 모델링하기 위하여 OpenSEES 프로그램에서 Elastomeric Bearing 명령어를 사용하였으며, 면진장치의 해석모델은 이선형(Bi-Linear)모델을 적용하였다.

2.3 입력지진의 특성

본 연구에서는 원전 표준설계스펙트럼에 대응하도록 작성한 인공지진 30개 세트[5]를 G0라고 하고, G0에 방향성을 고려하여 작성한 최대-최소 응답스펙트럼(maximum-minimum spectra)에 대응하는 인공지진 30개 세트 M0라고 구분하여 지진해석에 사용하였다. 최대-최소 응답스펙트럼은 지진운동의 방향성과 변동성을 고려하기 위한 방법으로 Huang 등이 MCEER 기술보고서[6]에서 제안하였다. Fig. 4에는 지진에 대한 2자유도 구조물의 가속도응답의 강축방향과 약축방향 성분을 나타내었다. 이는 지진하중의 입사방향에 따라 구조물의 지진응답이 달라질 수 있음을 의미하기도 한다. 직교하는 두 수평방향(h1과 h2 방향)의 가속도 값을 곱하고 이를 제곱근한 식 (1)에 나타낸 기하평균(Geomean)으로 지진응답의 크기를 나타낸다면, 강축 방향의 가속도 값($S_{a,\max}$)은 기존 수평방향(h1) 성분에 F_h를 곱하고 약축방향의 가속도 값($S_{a,\min}$)은 기존 수평방향(h2) 성분에 $1/F_h$을 곱하면 기하평균의 값은 변화시키지 않으면서 최대-최소 응답스펙

트럼을 작성할 수 있다.

$$Geomean = \sqrt{S_{a,\max} \times S_{a,\min}} \quad (1)$$

원전표준스펙트럼에 맞게 작성된 G0그룹의 인공지진을 사용하여 작성

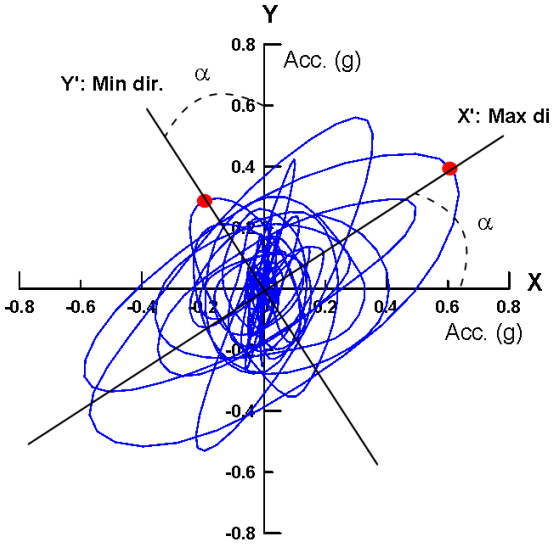


Fig. 4. Typical example of acceleration orbit of a 2-degree-of freedom system used to compute maximum-minimum spectra (TCU072 acceleration record[5] is used)

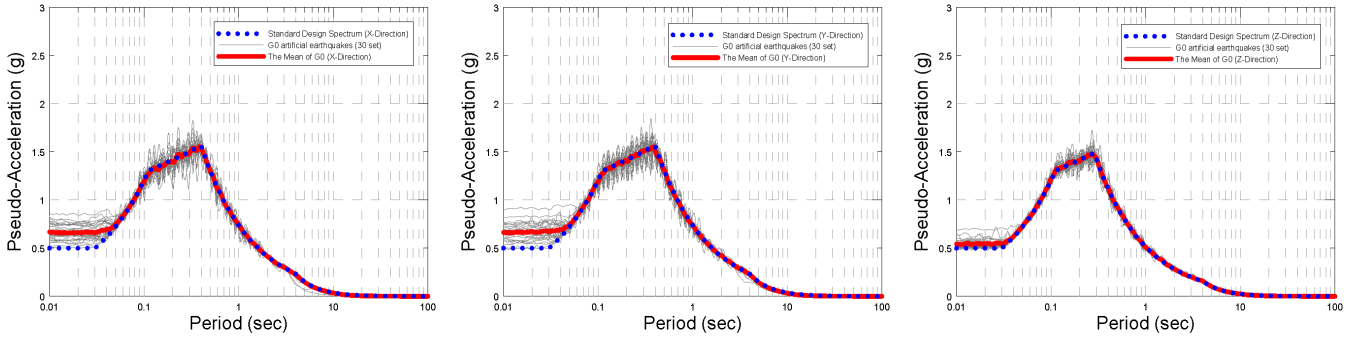
한 응답스펙트럼을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 해외 강진지역 수출용 원전의 면진설계를 위하여 영주기 가속도(ZPA)는 0.5 g로 작성되었으며 수평 두방향 h1, h2과 수직방향 v1을 1세트로 한다.

G0에 사용된 인공지진 30세트로부터 지진의 강축 및 약축 방향에 대한 방향성을 고려하고 또한 변동성을 고려하여 작성한 인공지진 30세트가 M0이다. 즉, M0는 G0 입력지진에 X축에 F_h, Y에 $1/F_h$, Z축 성분에 F_v 값을 무작위로 적용시킨 30세트의 입력지진을 말한다. 지진그룹 M0을 사용하여 작성한 최대-최소 응답스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. F_h(수평방향)와 F_v(수직방향)의 확률변수가 구해진 근거는 Huang 등[6]의 연구결과를 참조하였으며 요약하면 다음과 같다. M_w(모멘트 규모) 6.5이상, 15 km 미만의 진원의 근거리지진 147세트의 실제 지진을 통해 구한 F_h의 중앙값(θ)은 1.3, 대수표준편차(β)는 0.13, F_v의 중앙값(θ)은 1.0, 대수표준편차(β)는 0.18이다. 이와 같은 대수정규분포를 가지는 확률밀도함수에 대하여 라틴하이퍼큐브샘플링(Latin hypercube sampling, LHS)방법을 이용하여 30개의 F_h와 F_v 값을 구하였고 이를 Fig. 7과 Table 2에 나타내었다.

3. 원전구조물의 지진응답 비교

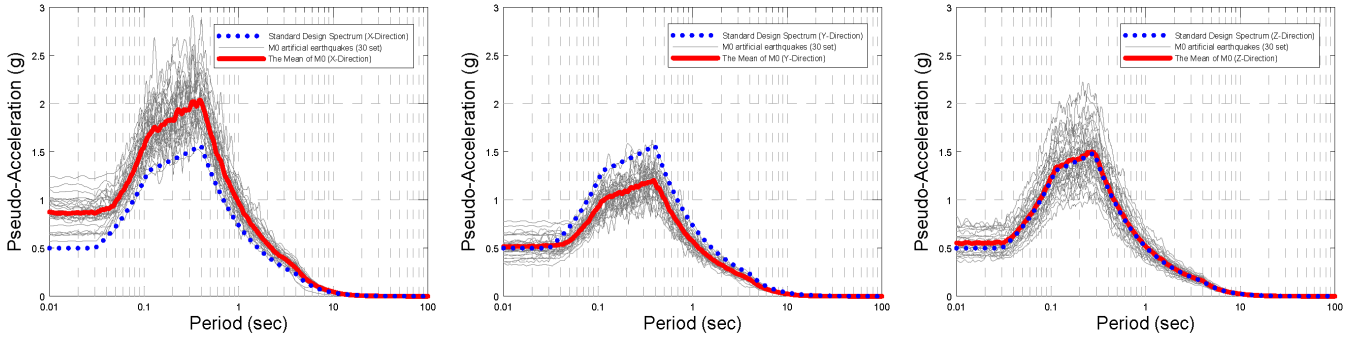
3.1 지진하중에 따른 면진장치와 격납구조물의 변위응답의 비교

면진장치의 안정성을 검토하기 위해서 설계기준지진(DBE)뿐만 아니라 설계초과지진(BDBE)에 대해서도 해석을 수행할 필요가 있다. 설계초과지진에 대해서는 면진장치를 보호하기 위한 정지체의 설계에 반영하여



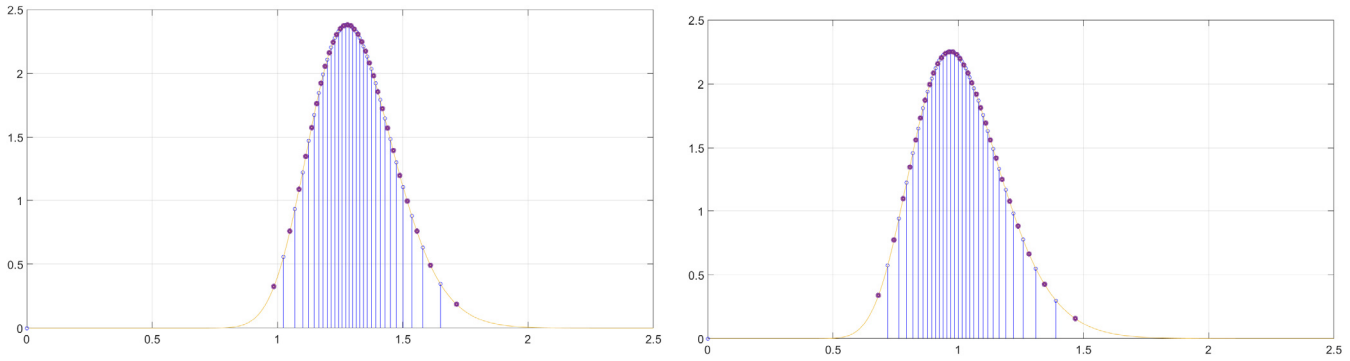
(a) h1 horizontal component (b) h2 horizontal component (c) v1 vertical component

Fig. 5. Comparison of response spectrum for G0 group of 30 set artificial earthquakes corresponding to standard design spectrum



(a) h1 horizontal component (b) h2 horizontal component (c) v1 vertical component

Fig. 6. Comparison of maximum-minimum response spectrum for M0 group

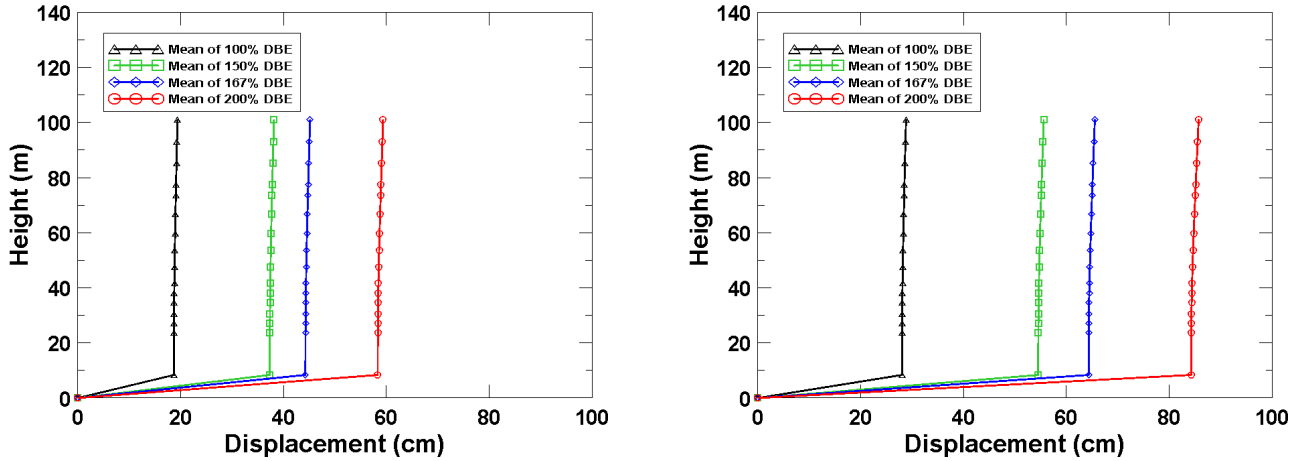


(a) F_h sampling (b) F_v sampling

Fig. 7. F_h and F_v sampling by using Latin Hypercube sampling method

Table 2. F_h and F_v by using Latin Hypercube sampling method

F_h	0.986, 1.050, 1.086, 1.113, 1.136, 1.156, 1.174, 1.191, 1.207, 1.222, 1.236, 1.251, 1.265, 1.279, 1.293, 1.307, 1.321, 1.336, 1.351, 1.367, 1.383, 1.401, 1.419, 1.439, 1.462, 1.488, 1.518, 1.556, 1.610, 1.714
F_v	0.682, 0.744, 0.780, 0.807, 0.830, 0.850, 0.868, 0.886, 0.902, 0.918, 0.933, 0.948, 0.963, 0.978, 0.993, 1.008, 1.023, 1.039, 1.055, 1.072, 1.090, 1.109, 1.129, 1.151, 1.176, 1.205, 1.239, 1.283, 1.345, 1.467



(a) mean displacements for G0 (b) mean displacements for M0

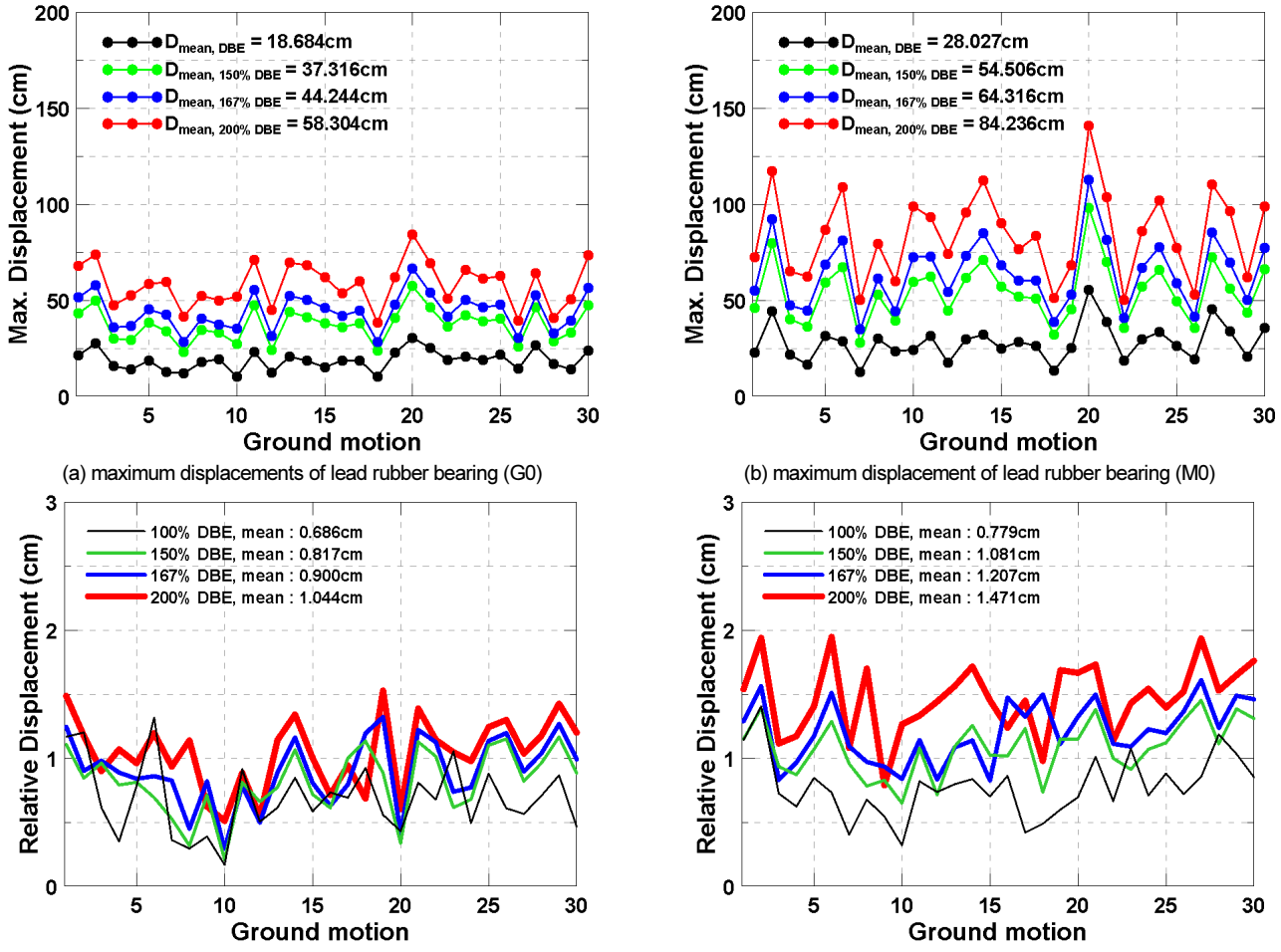
Fig. 8. Comparison of mean maximum displacement responses of containment buidling subjected to 100%, 150%, 167%, 200% Design Basis Earthquakes

야 하기 때문이다. 설계초과지진을 설계기준지진의 150%, 167%, 200%로 설정하여 거동을 분석하고 지진응답을 비교하였다. 미국 원자력 규제위원회 U.S. NRC에서는 설계기준지진의 1.67배 되는 지진을 설계초과지진으로 지정하여 사용하고, ASCE에서는 설계기준지진의 1.5배 되는 지진을 설계초과지진으로 지정하여 사용한다. 따라서 본 논문에서도 설계기준지진의 150%, 167%를 설계초과지진으로 지정하고, 그 외에 200%까지 설계초과지진으로 지정하여 해석을 수행하였다.

G0와 M0 지진그룹 각각 30개 세트에 대한 원전 격납구조물의 최대변위응답들을 구하고 이를 평균하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 평균변위응답엔 설계기준지진(100% DBE)와 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)에 대하여 구분하여 나타내었다. 상부밑면매트, 면진장치, 하부밑면매트를 포함한 면진층의 두께는 16.764 m이므로 Fig. 8로부터 대부분의 변위응답은 면진장치가 부담하고 있음을 알 수 있다. 격납구조물의 하층부와 상층부의 상대적인 변위차이는 크지 않음을 알 수 있다.

G0와 M0 지진 세트 각각 30개에 따른 면진장치의 최대변위응답을 비교하여 Fig. 9(a)와 9(b)에 나타내었다. 각각의 지진에 대한 면진장치의 최대변위응답의 평균(D_{LRB})을 G0 지진그룹(D_{LRB-G0})과 M0 지진그룹(D_{LRB-M0})을 구분하여 Table 3에 나타내었다. G0 지진그룹의 면진장치의 최대변위응답의 평균값(D_{LRB-G0})에 대한 M0 지진그룹의 면진장치의 최대변위응답의 평균값(D_{LRB-M0})의 비(D_{LRB-M0}/D_{LRB-G0})를 구하여 Table 3에 나타내었다. D_{LRB-M0}/D_{LRB-G0}의 분포는 1.43~1.51을 나타내며 M0 지진그룹에 의한 면진장치의 변위응답이 G0 지진그룹에 비하여 약 1.4~1.5배 정도 크게 나타남을 의미한다.

G0와 M0 지진 세트 각각 30개에 따른 격납구조물의 상대변위응답을 비교하여 Fig. 9(c)와 9(d)에 나타내었다. G0 지진그룹의 격납구조물의 상하층부의 상대변위응답의 평균값($D_{containment-G0}$)에 대한 M0



(a) maximum displacements of lead rubber bearing (G0)

(b) maximum displacement of lead rubber bearing (M0)

(c) relative displacements between top and bottom of containment building (G0)

(d) relative displacements between top and bottom of containment building (M0)

Fig. 9. Comparison of maximum displacements of lead rubber bearing and relative displacements containment building subjected to 100%, 150%, 167%, 200% Design Basis Earthquakes

Table 3. Comparison of mean value of maximum displacements(D_{LRB}) of lead rubber bearing and relative displacements ($D_{containment}$) containment building subjected to 100%, 150%, 167%, 200% Design Basis Earthquakes

Earthquakes	D_{LRB} (cm)		$\frac{D_{LRB-M0}}{D_{LRB-G0}}$	$D_{containment}$ (cm)		$\frac{D_{containment-M0}}{D_{containment-G0}}$
	G0	M0		G0	M0	
100% DBE	18.684	28.207	1.51	0.686	0.779	1.14
150% DBE	37.316	54.506	1.46	0.817	1.081	1.32
167% DBE	44.244	64.316	1.45	0.900	1.207	1.34
200% DBE	58.304	83.236	1.43	1.044	1.471	1.41

지진그룹의 격납구조물의 상대변위응답의 평균값($D_{containment-M0}$)의 비($D_{containment-M0}/D_{containment-G0}$)를 구하여 Table 3에 나타내었다. $D_{containment-M0}/D_{containment-G0}$의 분포는 1.14~1.41을 나타내며 M0 지진그룹에 의한 격납구조물의 상대변위응답이 G0 지진그룹에 비하여 약 1.1~1.4배 정도 크게 나타남을 의미한다. 이는 표준스펙트럼에 대응하는 G0 지진그룹에 비하여 지진의 방향성의 불확실성을 반영한 최대-최소 스펙트럼에 대응하는 M0 지진그룹의 지진응답이 면진장치와 격납구조물의 변위응답에서 각각 40~50%, 10~40% 크게 나타남을 의미한다. 실제적인 자연발생 지진의 불확실성을 보다 적절히 모사하는 것이 최대-최소 스펙트럼에 대한 인공합성 지진이므로 표준스펙트럼에 대응하는 인공합성지진을 사용하는 경우는 실제 지진응답을 사용하는 경우보다 지진응답을 평균적으로 과소평가할 수 있음을 의미한다.

설계기준지진(DBE)에 응답에 대한 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)의 면진장치의 최대변위응답과 격납구조물의 상대변위응답의 비를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 설계초과지진의 세기가 커질수록 설계기준지진의 면진장치 변위응답($D_{LRB-DBE}$)에 대한 설계초과지진의 면진장치 변위응답($D_{LRB-BDBE}$)의 비율($D_{LRB-BDBE}/D_{LRB-DBE}$)은 1.93~3.12를 나타낸다. 설계초과지진의 설계기준지진에 대한 증가정도(1.5배, 1.67배, 2.0배)에 비해 면진장치의 변위응답의 증가비율이 약 40~110% 정도 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 설계초과지진의 세기가 커질수록 면진장

Table 4. Comparison of ratio of seismic responses of Beyond Design Basis Earthquake(150%, 167%, 200% DBE) to those of Design Basis Earthquake

BDBE	$D_{LRB-BDBE}/D_{LRB-DBE}$		$D_{containment-BDBE}/D_{containment-DBE}$	
	G0	M0	G0	M0
150% DBE	2.00	1.93	1.19	1.39
167% DBE	2.37	2.28	1.31	1.55
200% DBE	3.12	2.95	1.52	1.89

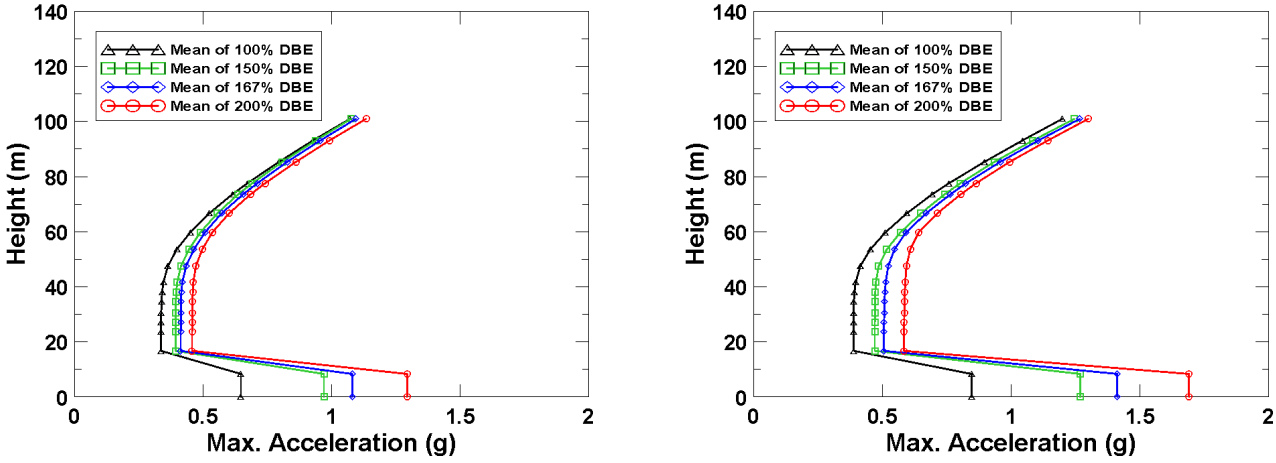


Fig. 10. Comparison of acceleration responses of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, and 167% design basis earthquakes

치의 비탄성 거동의 정도가 증가하므로 설계초과지진의 증가정도 보다 면진장치의 변위응답이 크게 나타나기 때문이다. 설계초과지진의 세기가 커질수록 설계기준지진의 격납구조물 상대변위응답($D_{containment-DBE}$)에 대한 설계초과지진의 격납구조물 상대변위응답($D_{containment-BDBE}$)의 비율($D_{containment-BDBE}/D_{containment-DBE}$)은 1.19~1.89를 나타낸다. 설계초과지진의 증가정도에 비해 격납구조물 상대변위응답의 증가비율이 약 10~30% 정도 더 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 설계초과지진에 대한 지진응답의 대부분을 면진장치가 흡수, 소산시키기 때문에 격납구조물에 전달되는 지진하중의 크기는 입력지진의 증가에 비해 줄어들기 때문으로 판단된다.

3.2 지진하중에 따른 면진장치와 격납구조물의 가속도 응답의 비교

설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진(150% DBE와 167% DBE) 하중에 대하여 면진된 격납구조물의 높이에 따른 가속도응답 최대값을 각각의 지진하중에 대하여 구하고 이를 평균값으로 구하여 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. Fig. 10에 나타낸 가속도 응답으로부터 격납구조물의 최상층의 가속도(a_2)와 격납구조물의 최하부층의 가속도(a_1)를 면진장치 기초부의 가속도(a_0)로 나누어 설계초과지진에 따른 입력지진의 가속도응답 변동율(a_1/a_0, a_2/a_0)과 격납구조물의 상하부층 가속도 변동율(a_2/a_1)을 구하였고 30개 입력지진에 대하여 각각 구하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)에 나타낸 a_1/a_0은 입력지진이 면진장치에 의해 가속도가 어느 정도 감소하는지를 나타내는 값으로서 평균적으로 약0.26~0.53의 분포를 나타내며 지진하중의 세기가 커질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 면진장치가 설계기준지진(PGA=0.5 g)에 맞춰서 지진하중을 0.3 g 수준으로 저감하도록 설계되었기 때문에 설계초과지진의 세기가 증가하여도 저감된 가속도는 0.3 g 수준에 비슷하게 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 지진하중의 세기가 클수록 저감되는 정도가 크게 나타나는 경향을 나타내며 면진장치의 가속도 저감 성능이 우수하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 11(b)에 나타낸 a_2/a_0는 입력지진 가속도(a_0)에 대한 격납구조물의 상층부의 가속도(a_2)의 비로서 평균값으로는 약0.9~1.7의 값을 가지며 지진하중의 세기가 증가할수록 작아지는 경향을 나타낸다. 상층부의 가속도는 지진하중의 세기의 증가에 큰 차이 없이 약1.1~1.15 g 정도를 나타낸다. 이는 면진장치가 지진하중의 세기의 증가 정도에 비하여 비교적 일정한 수준인 약0.3~0.45 g 정도로 큰 차이 없이 지진하중을 저감시켰기 때문이다. Fig. 11(c)에 나타낸 a_2/a_1는 격납구조물의 하층부의 가속도에 비해 최상층부의 가속도가 증폭되는 증폭율로 나타내며 약2.5~3.2의 분포를 나타내며 지진하중의 세기가 증가할수록 가속도 증폭률은 감소한다. Fig. 11(a)~(c)는 G0 지진그룹에 대한 가속도 응답의 비를 나타낸 것이며 Fig. 11(d)~(f)는 M0 지진그룹에 대한 가속도 응답의 비를 나타낸 것으로 두 지진그룹의 결과가 a_1/a_0와 a_2/a_1의 결과는 유사한 경향을 나타내지만 a_2/a_0의 결과는 G0 지진그룹에서는 약 0.9~1.7의 분포를 M0 지진그룹에서는 약 0.8~1.5의 분포로 작게 나타나는데 이는 M0 지진그룹의 입력가속도(약 0.8~1.7 g)가 G0의 입력가속도(약0.65~1.3 g) 보다 큰 분포를 가지지만 상층부의 가속도는 M0 지진그룹에서 약 1.2~1.3 g로 G0 지진그룹의 약 1.07~1.15 g로 큰 차이가 없기 때문이다. 이러한 현상은 면진장치가 세기가 강한 지진이 오더라도 격납

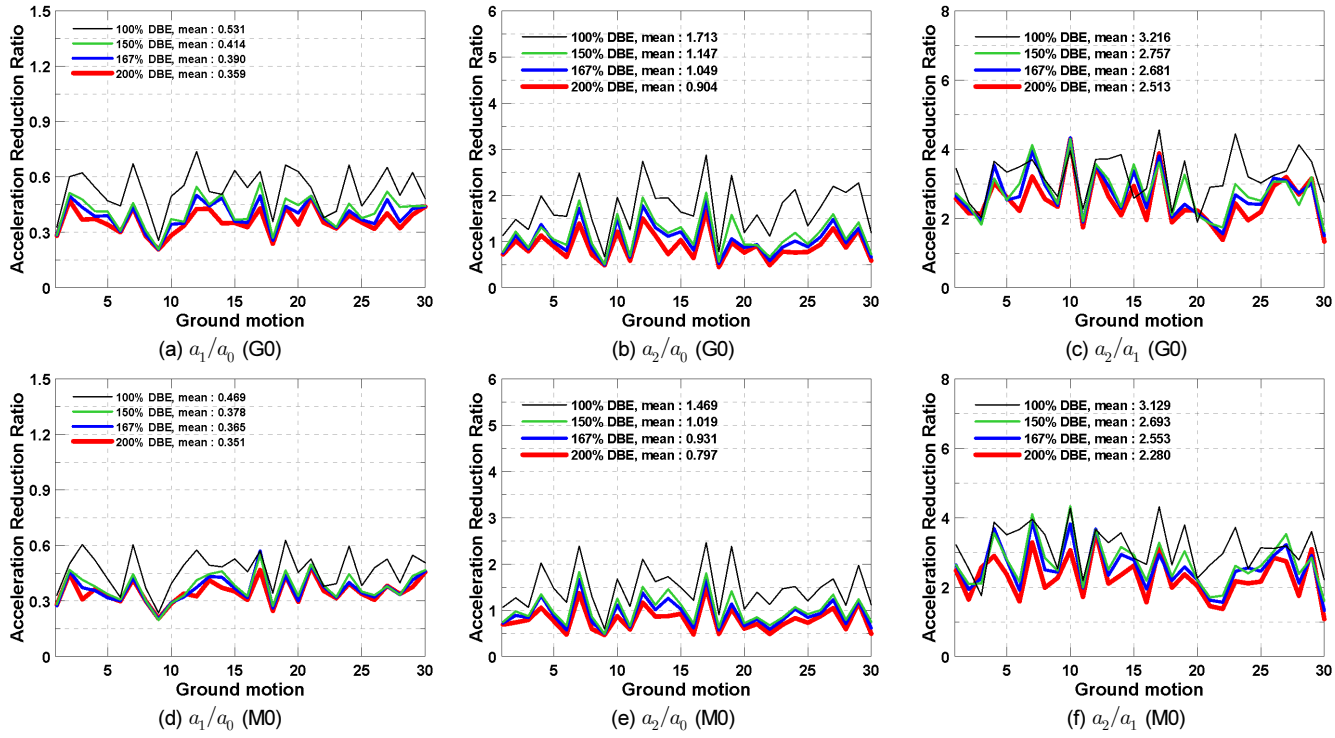


Fig. 11. Comparison of acceleration reduction ratios of seismically isolated NPP containment structure subjected to G0 and M0 earthquake group

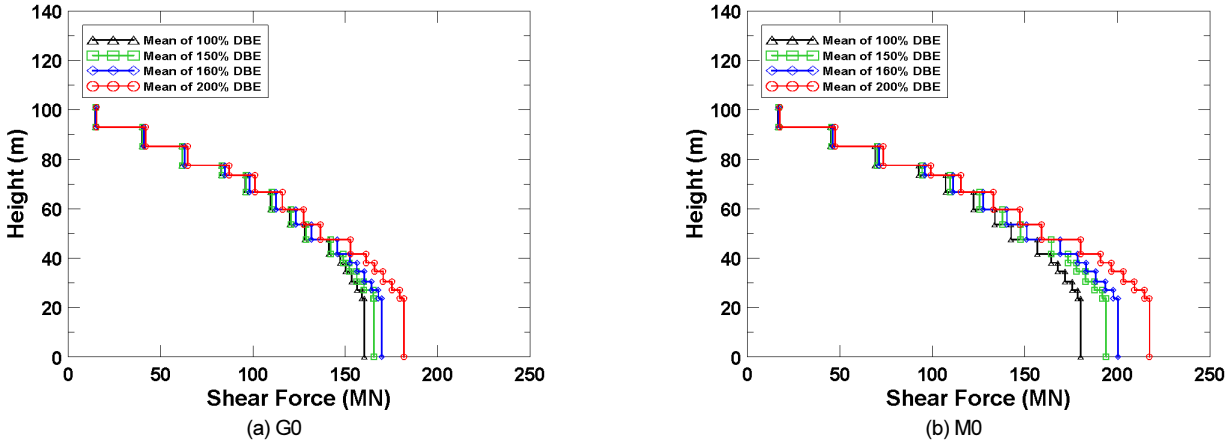


Fig. 12. Comparison of shear forces of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, 167%, and 200% design basis earthquakes

구조물에 전달되는 지진하중의 크기를 상당히 효과적으로 저감시키기 때문이다.

3.3 지진하중에 따른 격납구조물의 전단력 응답의 비교

격납구조물의 높이에 따른 전단력을 G0지진그룹과 M0 지진그룹에 대하여 구하여 Fig. 12에 나타내었다. 설계초과지진의 세기의 증가에 따른 전단력의 증가는 크지 않음을 알 수 있다. G0 지진그룹에 대한 밑면전단력은 약 160~182 MN의 분포를 나타내고 M0 지진그룹에 대한 밑면전단력의 분포는 약 180~217 MN의 분포를 나타낸다. 즉 M0 지진에 의한 밑면전단력이 G0 지진의 경우보다 약 1.13~1.19배 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 면진된 원전구조물의 지진취약도 해석

지진은 특성상 불확실성이 크므로 구조물의 지진에 대한 손상상태를 분석하기 위해서는 확률론적인 방법인 지진취약도 해석을 많이 사용한다. 지진 취약도 곡선은 임의의 지진강도에 대한 구조물의 손상확률을 나타낸다. Shinozuka 등[7, 8]이 제안한 취약도 곡선은 2변수 대수정규분포함수의 형태로 나타낸다. 여기서 2변수는 중앙값, 대수표준편차이며 최우도추정법을 통해 구할 수 있다. 최우도추정법이란 확률론적으로 가장 일어날 가능성이 크다는 것을 나타내는 개념이다. 구조물의 손상상태는 손상 없음(D_{s1}), 미소손상(D_{s2}), 중간손상(D_{s3}), 심각한 손상(D_{s4}), 완전 붕괴(D_{s5})의 5가지 경우로 구분하여 나타내었다. 각각의 손상상태에 대한 취약도 곡

선을 독립적으로 따로 구할 수 있지만 손상상태에 따른 취약도곡선이 서로 교차하는 현상이 발생하여서는 안 된다. 취약도 곡선이 교차한다는 것은 더 심각한 손상이 발생할 확률이 덜 심각한 손상보다 높다는 것을 의미하는데 이는 상식적으로 발생할 수 없는 것이기 때문에 개별 손상상태에 따른 취약도 곡선이 교차하지 않도록 하여야 한다. 취약도 곡선이 교차하는 현상은 모든 손상상태에 대하여 동일한 대수표준편차를 사용함으로서 방지할 수 있고 본 연구에서는 모든 손상상태에 대하여 동일한 대수표준편차를 구하는 방법을 사용하였다.

구조물의 임의의 지진응답이 특정 손상상태에 포함되는 경우, 해당되는 손상상태에 대한 손상발생확률만을 증가시킬 수 있도록 최우도함수를 구성한다. 즉, 미소손상(D_{s2}), 중간손상(D_{s3}), 심각한 손상(D_{s4}), 완전 붕괴(D_{s5})에 대한 지진취약도 곡선을 각각 $F_2(\bullet)$, $F_3(\bullet)$, $F_4(\bullet)$, $F_5(\bullet)$라고 하고, j번째 손상상태에 대한 지진취약도 곡선은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_j(a_i;c_j,\zeta_j)=\Phi\left[\frac{\ln(a_i/c_j)}{\zeta_j}\right] \tag{2}$$

여기서, c_j와 ζ_j는 j번째 손상상태에 대한 대수정규분포함수의 중앙값과 대수 표준편차를 의미한다. 미소손상(D_{s2}), 중간손상(D_{s3}), 심각한 손상(D_{s4}), 완전 붕괴(D_{s5})은 각각 j=1, 2, 3, 4로 정의한다. 이러한 취약도 곡선의 정의로부터 대수표준편차가 모든 손상상태에 대한 취약도곡선에서 동일하도록 공통 대수표준편차 ζ를 가진다는 가정으로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
P(D_{s1}) &= P(a_i, D_{s1}) = 1-F_2(a_i;c_2,\zeta)\\
P(D_{s2}) &= P(a_i, D_{s2}) = F_2(a_i;c_2,\zeta)-F_3(a_i;c_2,\zeta)\\
P(D_{s3}) &= P(a_i, D_{s3}) = F_3(a_i;c_2,\zeta)-F_4(a_i;c_2,\zeta)\\
P(D_{s4}) &= P(a_i, D_{s4}) = F_4(a_i;c_2,\zeta)-F_5(a_i;c_2,\zeta)\\
P(D_{s5}) &= P(a_i, D_{s5}) = F_5(a_i;c_2,\zeta)
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, $P(a_i, D_{sk})$는 PGA=a_i인 지반운동에 대해 무작위로 선택된 구조물의 응답이 손상상태 $D_{sk}(k=1,2,3,4,5)$일 확률을 나타낸다.

우도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta) = \prod_{i=1}^{N}\prod_{k=1}^{5} P(a_i;D_{sk})^{x_{ik}} \tag{4}$$

여기서, x_{ik}는 i 번째 구조물이 k 번째 손상상태에 있으면 $x_{ik}=1$의 값을 가지고 그 외의 경우에는 $x_{ik}=0$의 값을 가진다. 최우도 방법은 다음의 식을 풀면 c_j와 ζ를 평가할 수 있다.

$$\frac{\partial L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta)}{\partial c_j} = \frac{\partial L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta)}{\partial \zeta} = 0 \quad (j=1,2,3,4) \tag{5}$$

공통대수 표준편차를 사용하는 방법에 의한 취약도 곡선의 작성 예를 Fig. 13에 나타내었다.

면진된 원전구조물은 지진하중에 의한 대부분의 지진에너지를 면진장치가 부담하므로 면진장치만 비탄성 거동을 하고 면진장치를 제외한 나머지 원전 구조물은 탄성거동을 할 것이므로, 면진 원전구조물의 손상상태는 면진장치에 국한하여 구하는 것이 합리적이다. 면진장치의 손상상태는 면진장치(LRB)의 전단변형률을 이용하여 정의하는 방법을 사용하였다. 면진장치의 전단변형률에 따른 손상상태의 정의는 Zhang과 Hou의 논문에서 사용한 전단변형률에 대한 손상상태 정의 방법을 사용하였다[9, 10]. 전단변형률(γ) 식은 식 (6)과 같으며 λ은 납-고무받침의 횡방향 최대변위이고 l은 납-고무받침의 높이로 0.21 m이다. 식 (6)을 이용하여 정의한 손상상태는 Table 5에 정리하여 나타내었다.

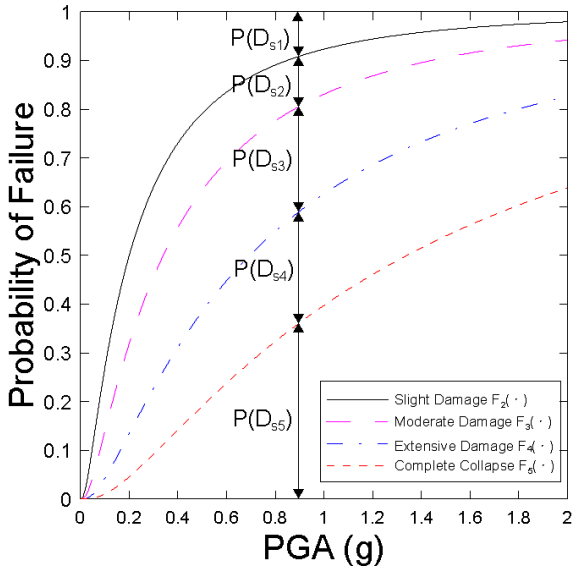


Fig. 13. Schematics of fragility curves

Table 5. Definition of Damage States of LRB

Damage State	Shear Strain (γ) of LRB	Maximum Lateral Displacement (λ) of LRB
Slight Damage (D_{S2})	γ > 100%	λ > 0.210 m
Moderate Damage (D_{S3})	γ > 150%	λ > 0.315 m
Extensive Damage (D_{S4})	γ > 200%	λ > 0.420 m
Collapse Damage (D_{S5})	γ > 400%	λ > 0.840 m

$$\gamma = \frac{\lambda}{l} \tag{6}$$

Fig. 9(a)~(b)에 나타낸 면진장치의 최대변위에 대하여 Table 5에 나타낸 손상상태의 정의를 이용하여 면진장치의 손상상태(D_{S2}~D_{S5})를 판별하고, 지진하중의 최대지반가속도에 따른 특정 손상상태 도달여부를 작성하여 이로부터 식 (2)~식 (4)에 나타낸 최우도법을 이용하여 손상상태별 지진취약도 곡선의 대수정규분포함수의 중앙값(c_k)과 공통 대수표준편차(ζ)를 구하여 Table 6에 나타내었다. 지진취약도 해석을 위해서는 설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진(150% DBE와 167% DBE) 하중에 대한 모든 지진응답(각 지진그룹별로 120개 지진세트의 응답)을 사용하여 지진취약도 해석을 수행하였다.

Table 6. Median(c_k) and common standard deviation(ζ) of fragility curves of LRB

Damage State	G0		M0	
	c_k	ζ	c_k	ζ
Slight	0.4367	0.3790	0.3888	0.4060
Moderate	0.5306		0.5000	
Extensive	0.6510		0.5020	
Collapse	0.9837		0.9245	

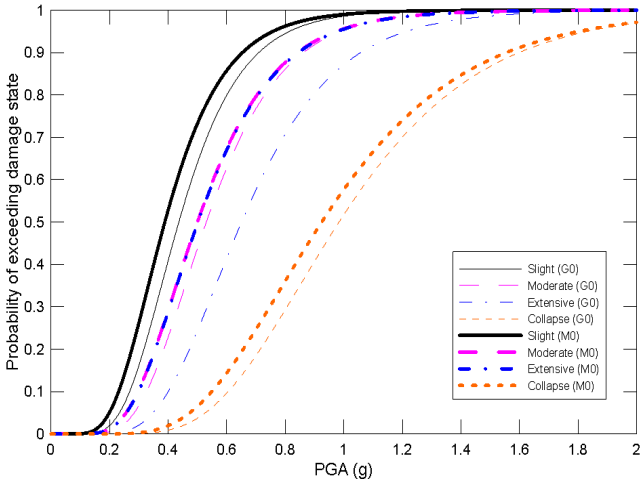


Fig. 14. Comparison of Seismic fragility at the LRB subjected to G0 and M0 group earthquakes

Table 6으로부터 공통 대수표준편차(ζ)는 G0 지진의 경우 0.379이고 M0 지진의 경우 0.406으로 약간 크게 나타났다. 이는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 M0 지진이 최대-최소 스펙트럼에 대응되는 지진으로 지진의 크기가 수평방향 두 성분에 대해서는 대수표준편차가 0.13이고 수직방향 지진하중의 크기는 대수표준편차로 0.18을 가지도록 30개 지진세트를 생성하였기 때문에 지진하중의 크기의 편차가 면진장치의 응답의 불확실성에 기여를 하였기 때문이다. 각 손상상태별 면진장치의 취약도 곡선의 중앙값(c_k)은 M0 지진그룹보다 G0 지진그룹이 대략 6~30% 크게 나타난다. 이는 다시 말하면 손상상태별 손상확률이 50% 되는 지진가속도가 G0 지진그룹이 대략 6~30% 크다는 것을 의미하여 M0 지진그룹의 지진하중이 구조물에 동일한 손상을 유발하는 지진가속도가 더 작음을 의미한다. 즉, M0 지진그룹이 동일한 지반가속도이더라도 구조물에 손상을 줄 확률이 크게 나타남을 의미한다. Table 6에 나타낸 손상상태별 취약도 곡선의 중앙값(c_k)과 공통 대수표준편차(ζ)를 이용하여 취약도 곡선을 작성하여 Fig. 14에 나타내었다. 본 연구에 사용된 원전용 면진장치인 납-고무받침(LRB)은 최대지반가속도(PGA)가 0.5 g일 때 원전에 전달되는 지진가속도를 0.3 g 이하로 저감시키도록 설계하였다. 최대지반가속도(PGA)가 0.5 g일 경우에 면진장치가 파괴될 확률은 M0 지진그룹에 대해서는 약 5%로 나타나고 G0 지진그룹에 대해서는 약 3%로 나타나고 있다.

5. 결 론

원전설계용 표준설계스펙트럼에 대응하도록 생성한 인공합성지진인 G0 지진그룹을 사용하였을 때와 지진의 입사방향의 변동성에 따른 강축과 약축 지진응답의 불확실성을 고려하는 최대-최소 스펙트럼에 대응하는 M0 지진그룹을 사용하여 납-고무받침으로 면진된 원전구조물의 지진응답과 지진취약도 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) G0와 M0 지진그룹 각각 30개 세트에 대한 원전 격납구조물의 최대 변위응답으로부터 대부분의 변위응답은 면진장치가 부담하며, 격납구조물의 하층부와 상층부의 상대적인 변위차이는 크지 않음을 알 수 있다.
2) 표준스펙트럼에 대응하는 G0 지진그룹에 비하여 지진의 방향성의 불확실성을 반영한 최대-최소 스펙트럼에 대응하는 M0 지진그룹의 지진응답이 면진장치와 격납구조물의 변위응답에서 각각 40~50%, 10~40% 크게 나타났다. 실제적인 자연발생 지진의 불확실성을 보다 적절히 모사하는 것이 최대-최소 스펙트럼에 대한 인공합성 지진이므로 표준스펙트럼에 대응하는 인공합성지진을 사용하는 경우는 실제 지진응답을 사용하는 경우보다 지진응답을 평균적으로 과소평가할 수 있음을 의미한다.
3) 설계초과지진의 세기가 커질수록 설계기준지진의 면진장치 변위응답($D_{LRB-DBE}$)에 대한 설계초과지진의 면진장치 변위응답($D_{LRB-BDBE}$)의 비율($D_{LRB-BDBE}/D_{LRB-DBE}$)은 1.93~3.12를 나타낸다. 설계초과지진의 설계기준지진에 대한 증가정도(1.5배, 1.67배, 2.0배)에 비해 면진장치의 변위응답의 증가비율이 약 40~110% 정도 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 설계초과지진의 세기가 커질수록 면진장치의 비탄성 거동의 정도가 증가하므로 설계초과지진의 설계기준지진에 대한 증가 정도 보다 면진장치의 변위응답이 크게 나타나기 때문이다.
4) 설계초과지진의 세기가 커질수록 설계기준지진의 격납구조물 상대변위응답($D_{containment-DBE}$)에 대한 설계초과지진의 격납구조물 상대변위응답($D_{containment-BDBE}$)의 비율($D_{containment-BDBE}/D_{containment-DBE}$)은 1.19~1.89를 나타낸다. 설계초과지진의 증가정도에 비해 격납구조물 상대변위응답의 증가비율이 약 10~30% 정도 더 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 설계초과지진에 대한 지진응답의 대부분을 면진장치가 흡수, 소산시키기 때문에 격납구조물에 전달되는 지진하중의 크기는 입력지진의 증가에 비해 줄어들기 때문으로 판단된다.
5) 격납구조물의 최하부층의 가속도(a_1)를 면진장치 기초부의 가속도(a_0)로 나눈 값 a_1/a_0은 입력지진이 면진장치에 의해 가속도가 어느 정도 감소하는지를 나타내는 값으로서 평균적으로 약 0.26~0.53의 분포를 나타내며 지진하중의 세기가 커질수록 감소하는 경향을 나타낸다.
6) M0 지진에 의한 격납구조물의 밑면전단력이 G0 지진의 경우보다 약

1.13~1.19배 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

7) 손상상태별 면진장치의 취약도 곡선의 중앙값(c_k)은 M0 지진그룹보다 G0 지진그룹이 대략 6~30% 크게 나타난다. 이는 다시 말하면 손상상태별 손상확률이 50% 되는 지진가속도가 G0 지진그룹이 대략 6~30% 크다는 것을 의미하여 M0 지진그룹의 지진하중이 구조물에 동일한 손상을 유발하는 지진가속도가 더 작음을 의미한다.

8) 최대지반가속도(PGA)가 0.5 g일 경우에 면진장치가 파괴될 확률은 M0 지진그룹에 대해서는 약 5%로 나타나고 G0 지진그룹에 대해서는 약 3%로 나타나고 있다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A3A03000767)에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER Ground Motion Database. Available from: https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-database.
2. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation. Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. 2007. Available from: http://opensees.berkeley.edu.
3. KEPIC-STC. Seismic isolation system. Korea Electric Association. c2017.
4. Seok CG, Song JK. Seismic Performance Evaluation of Seismically Isolated Nuclear Power Plants Considering Various Velocity-Dependent Friction Coefficient of Friction Pendulum System. EESK J Earthquake Eng. 2016;20(2):125-134.
5. Huang YN, Whittaker AS, Luco N. Maximum spectral demands in the near-fault region. Earthquake Spectra. 2008;24(1):319-341.
6. Huang YN, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL. Assessment of Base-Isolated Nuclear Structures for Design and Beyond-Design Basis Earthquake Shaking. Technical Report MCEER0-09-0008. c2009.
7. Shinozuka M, Feng MQ, Kim HK, Ueda T. Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research., New York. c2002.
8. Shinozuka M, Feng MQ, Lee JH. Statistical analysis of fragility curves. Journal of Engineering Mechanics. 2000;126(12):1224-1231.
9. Zhang J, Huo Y. Optimum isolation design for highway bridges using fragility function method. Proceedings of the 14 WCEE; 2008 Oct 12-17; Beijing, China. c2008.
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.