

면진된 원자력발전소 구조물의 경주지진 응답평가

Seismic Response Evaluation of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure Subjected to Gyeong-Ju Earthquake

김광전¹⁾ · 양광규¹⁾ · 김현정¹⁾ · 김병수¹⁾ · 윤수정¹⁾ · 송종걸^{1)*}Kim, Gwang-Jeon¹⁾ · Yang, Kwang-Kyu¹⁾ · Kim, Byeong-Su¹⁾ · Kim, Hyeon-Jeong¹⁾ · Yun, Su-Jeong¹⁾ ·Song, Jong-Keol^{1)*}¹⁾강원대학교 토목공학과¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The Gyeong-Ju earthquake in the magnitude of 5.8 on the Richter scale occurred in September 12, 2016. Because there are many nuclear power plants (NPP) near the epicenter of the Gyeong-Ju earthquake, the seismic stability of nuclear power plants is becoming a social problem. In order to evaluate the safety of seismically isolated NPP, the seismic response of a NPP subjected to the Gyeong-Ju earthquake was compared with those of 30 sets of artificial earthquakes corresponding to the nuclear standard design spectrum (NSDS). A 2-node model and a simple beam-stick model were used for the seismic analysis of seismically isolated NPP structures. Using 2-node model, the effect of internal temperature rise, decrease of shear stiffness, increase of lateral displacement and decrease of vertical stiffness according to nonlinear behavior of lead-rubber bearing (LRB) were evaluated. The displacement response, the acceleration response, and the shear force response of the seismically isolated nuclear containment structure were evaluated using the simple beam-stick model. It can be observed that the seismic responses of the isolated nuclear structure subjected to Gyeong-Ju earthquake is significantly less than those to the artificial earthquakes corresponding to NSDS.

Key words: Gyeong-Ju earthquake, Nuclear power plant, Lead-rubber bearing, Heating effect, Seismic response, Seismic isolation

1. 서론

우리나라의 지리적 위치는 판내에 위치하고 있어 상대적으로 지진으로부터 안전하다는 인식이 많았지만 2016년 9월 12일 경북 경주시에서 연속적으로 발생한 규모 5.1과 5.8의 지진은 한반도에도 강진으로부터 안전지대가 아님을 확인시켜주었다. 계기관측 이전 한반도의 지진에 대한 기록은 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등에서 나타났으며 규모 6 이상의 지진도 발생하였을 것이라 추정하고 있다. 경주지진이 발생하기 전 7월 6일 울산 해역에서 발생한 규모 5.0의 지진 등 이번 한해에만 벌써 규모 5.0 이상의 지진이 3차례 발생하면서 진양지 인근의 원자력발전소(이후 원전이라 표기

함)에 대한 안전성에 대한 논의가 제기되고 있는 상황이다. 본 연구는 원전 구조물에 면진장치가 설치된 경우에 대하여 경주지진에 대한 지진응답을 분석하는 것이 주된 내용이며 경주지진에 대한 응답과 원전구조물의 설계 표준스펙트럼에 대응하는 인공지진 30개 세트에 대한 응답과도 비교하여 평가하였다. 현재까지 국내에 면진장치가 적용되지는 않았지만 강진에 대비하여 원전의 안전성을 확보하기 위하여 면진의 적용성에 대하여 활발한 연구가 진행되어 왔고 앞으로도 이에 대한 연구가 지속될 필요성이 있다.

면진장치는 횡방향 강성이 상대적으로 작기 때문에 구조물의 고유주기를 장주기로 변화시키는 특성을 가지며, 장주기화의 결과로 일반적으로 상부구조물의 가속도 응답과 구조물에 직접적인 손상을 유발하는 상대 변위를 저감시키는 기능을 한다. 지진하중 작용시 대부분의 비탄성응답을 면진장치가 부담하기 때문에 면진장치에 파괴로 인한 상부구조물의 안정성 상실을 검토하여야 한다.

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received November 19, 2016; Revised November 29, 2016; Accepted December 1, 2016)

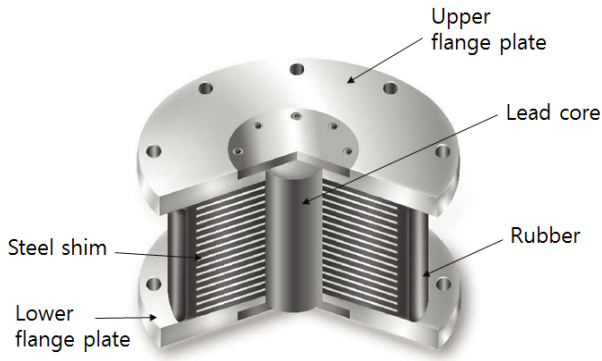


Fig. 1. Lead-Rubber Bearing (LRB)

LRB는 Fig. 1.에 나타낸 바와 같이 고무와 철판을 번갈아 겹친 적층형태로 중앙부에 납심을 삽입한 형태로 구성되어 고무의 탄성 특성과 납심의 소성 거동에 의하여 지진에너지를 소산시키며, 교량 및 원전구조물 등에 가장 많이 사용되고 있는 면진장치이다.

LRB 면진장치가 적용된 원전구조물의 응답에 대하여는 기존에 연구 [1-3]가 되어 왔고 현재도 국내의 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 오고 있는 상황이다. 최근 발생한 경주지진의 진앙지 인근에 많은 원전구조물들이 위치하고 있어서 원전의 안정성에 대한 국가적인 관심이 증대되어 오고 있는 상황이다. 현재 국내에 원전구조물에 면진이 적용된 사례는 없지만 해외 강진지역으로 국내표준원전을 수출하기 위하여 면진이 적용된 원전구조물의 지진응답에 대한 연구는 활발히 진행되고 오고 있었다. 본 연구는 경주지진이 면진된 원전구조물에 작용한다면 어떠한 응답을 나타내는지를 분석하는 목적이며, 경주지진에 의한 지진응답의 수준을 비교하기 위하여 원전용 표준설계스펙트럼에 대응하는 30개 인공지진을 작성하여 이를 적용시킨 경우와 비교하였다.

2. 경주지진과 원전표준설계스펙트럼의 비교

2.1 원전표준설계스펙트럼 특성

원전구조물의 내진설계를 위해서는 원전용 표준설계스펙트럼을 사용한다. 면진된 원전구조물의 지진해석을 위하여 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진을 RspMatch 프로그램[4, 5]을 이용하여 X, Y, Z 방향에 대한 30세트를 생성하였다. RspMatch 프로그램은 실제의 지진가속도 기록을 SEED 지진[6]으로 사용하여 목표로 하는 응답스펙트럼에 대응되도록 변환시켜주는 프로그램이기 때문에 인공지진가속도 기록에 실제 지진가속도 응답의 특성을 반영하도록 하는 장점이 있다. 원전표준스펙트럼과 이에 대응되도록 생성된 인공지진에 의한 응답스펙트럼을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 굵은 실선은 RspMatch 프로그램을 이용하여 생성된 30개의 인공지진 응답스펙트럼의 평균값을 나타내며, 굵은 점선은 원전표준스펙트럼[7, 8]을 나타낸다. 원전표준설계스펙트럼은 Fig. 2에서 최대지반가속도(PGA)가 0.5 g와 0.3 g에 대하여 두가지 경우로 나타내었으며 최대지반가속도가 0.5 g인 원전표준스펙트럼은 면진원전의 수출을 위한 해외의 강진지역을 반영하기 위해 생성된 것이며, 최대지

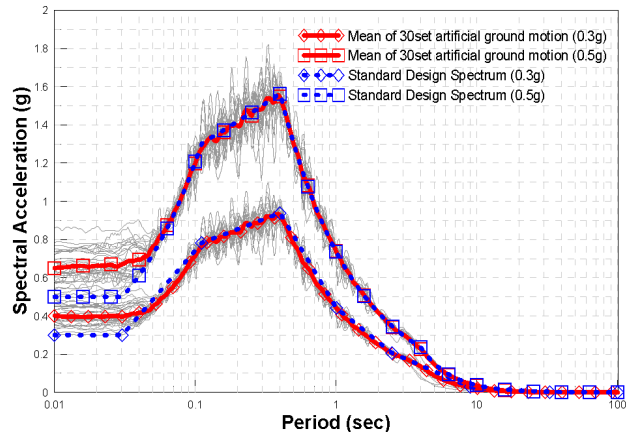


Fig. 2. Comparison of acceleration response spectrum of 30 set artificially generated records by RspMatch according to nuclear standard design spectrum (horizontal X-direction)

반가속도가 0.3 g인 원전표준스펙트럼은 국내의 원전의 내진설계에 사용되는 것이다. 본 연구에서는 0.3 g인 원전표준스펙트럼에 대응되는 인공지진을 사용하여 지진해석을 수행하였다. 원전표준스펙트럼과 인공지진의 응답스펙트럼의 평균값이 0.05 sec 이하의 단주기 영역을 제외한 나머지 주기영역에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

2.2 경주 지진의 특성

2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진은 진원 깊이가 13 km이다. 진앙지에서 가까운 3곳인 DKJ(덕정리), MKL(명계리)와 USN(울산) 관측소에서 관측한 가속도 기록을 지진해석에 사용하였다. 이 세 곳에서 관측된 수평 두방향 성분과 수직성분에 대한 가속도 기록을 Fig. 3에 비교하여 나타내었다. 세 곳의 관측소에 계측된 지진가속도 응답의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 Table 1에 3방향 성분으로 구분하여 나타내었다.

원전표준설계스펙트럼과 3 곳에서 관측한 경주지진의 응답스펙트럼을 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. USN 관측소 수평방향 지진성분의 응답스펙트럼이 0.1 초 주기부근에서 원전의 표준스펙트럼 보다 대략 2배정도 크게 나타남을 알 수 있으며 0.2 초 주기 이상의 주기영역에 대해서는 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, MKL 관측소 수평방향 지진성분의 응답스펙트럼이 0.09 초 보다 짧은 주기영역에서 원전의 표준스펙트럼 보다 약간 크게 나타남을 알 수 있다.

3. 면진장치 및 원전구조물의 지진해석 모델

면진장치에 의해 면진된 원전구조물의 전형적인 형상을 Fig. 5에 나타내었다.

면진장치의 비선형 모델링 및 면진된 원전구조물의 지진해석은 OpenSEES 프로그램[9]을 사용하여 수행하였다. 면진장치는 강진에 대하여 일반적으로 비탄성응답을 하게 되며 이 과정에서 비탄성응답에 다양한 영향인자를 포함하여 해석하는 것이 해석결과의 정확성을 향상시킨다. 비탄성응답에

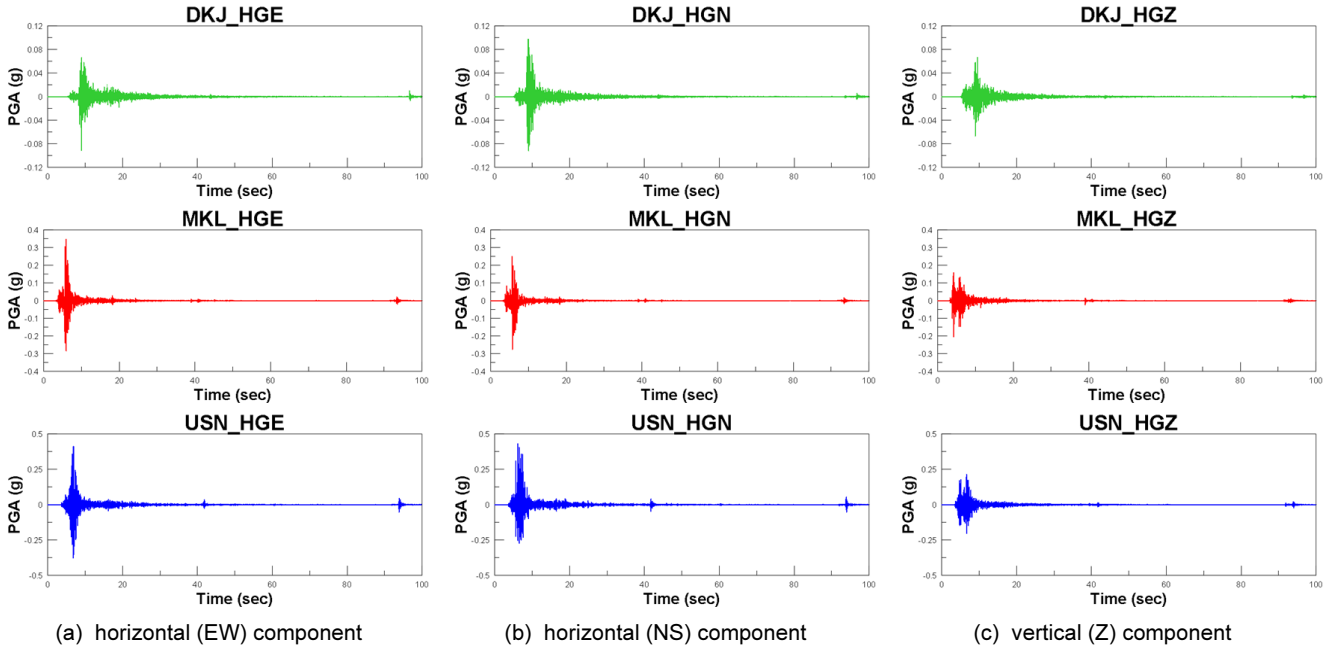


Fig. 3. Comparison of acceleration records at DKJ, MKL, and USN sites for Gyeong-Ju earthquake

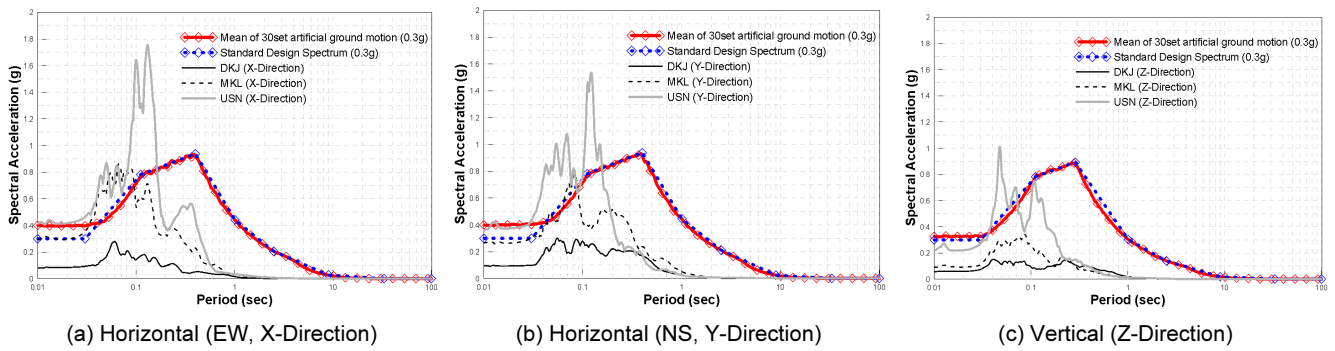


Fig. 4. Comparison of response spectrum of Gyeong-Ju earthquake and nuclear standard design spectrum.

Table 1. Peak ground acceleration of Gyeong-Ju earthquake

Station	Peak Ground Acceleration (g)		
	Horizontal (EW)	Horizontal (NS)	Vertical (Z)
DKJ	0.078	0.092	0.057
MKL	0.285	0.257	0.088
USN	0.404	0.351	0.213

대한 다양한 영향인자를 고려하기 위한 정밀해석을 위해서는 본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 2절점 모델을 사용하였다. 이는 면진된 원전 구조물에 설치된 수백개의 면진장치 중에서 대표적인 한 개의 경우만 선택하여 정밀해석 하는 것이다. 본 연구에서 면진장치로는 납-고무 받침(lead rubber bearing, LRB)을 사용하였으며 사용된 LRB의 제원은 Table 2에 나타내었다. 이 LRB는 원전구조물의 면진을 위하여 설계된 경우로 외경이 1.5m인 대형 면진장치이다. Fig. 5에 나타난 면진된 원전구조물을 OpenSEES 프로그램을 이용하여 간략화된 Beam-Stick 모델로 전환하여 Fig. 7에 나타내었다. 간략 Beam-Stick 모델의 경우 상부구조물을 격납구조물, 내부

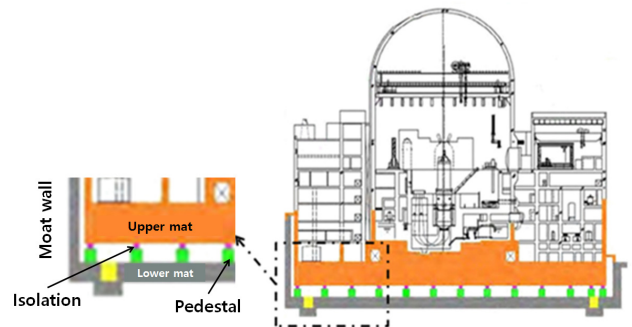


Fig. 5. Typical configuration of seismically isolated nuclear power plant

구조물, 보조건물 3부분으로 나누어 모델링 하였으며, 지진해석을 통하여 격납구조물, 내부구조물, 보조건물의 고유주기는 각각 0.27 초, 0.103 초, 0.157 초로 평가되었으며 이 결과는 정밀해석모델의 경우와 유사한 결과를 나타냄을 확인하였다. Table 2에 나타낸 LRB를 사용하여 원전구조물의

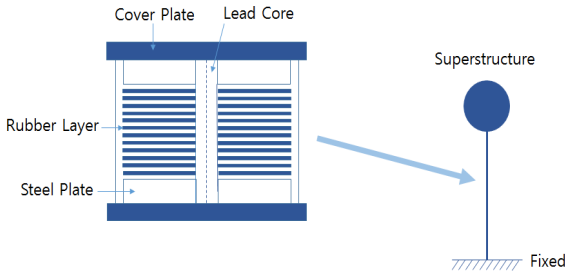


Fig. 6. 2-Node model for seismically isolated NPP by LRB

Table 2. Size and properties of LRB used in this study [6]

Size and Properties	Value
Inner Diameter (Lead Core)	400 mm
Outer Diameter	1500 mm
Rubber Thickness	7 mm
No. of Rubber Layer	30
Vertical Load	10,000 kN
Yield Displacement	1.88 mm
Yield Strength	1055.028 kN
Shear Modulus of Rubber	0.5 MPa
Shear Modulus of Lead	8.33 MPa

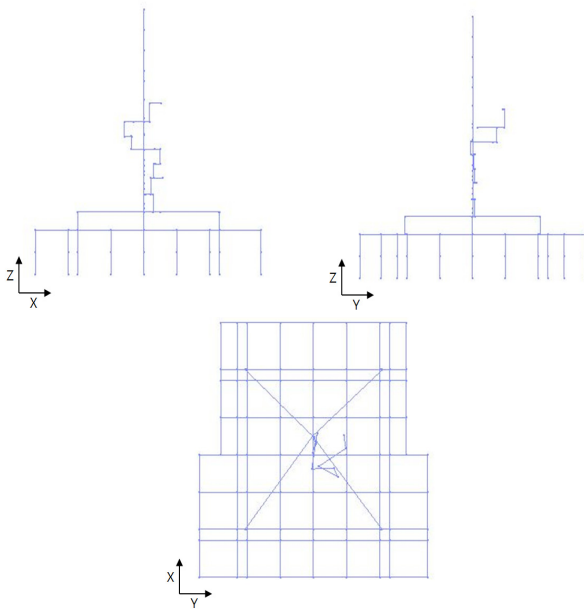
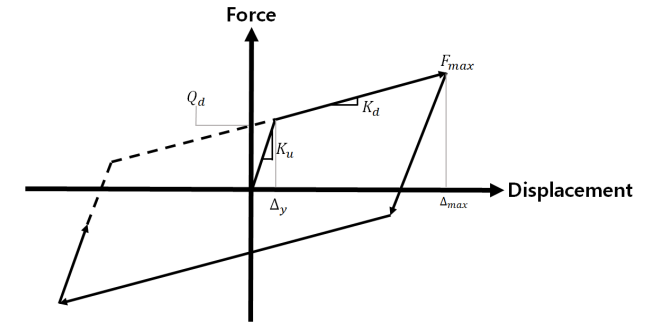


Fig. 7. Simple Beam-Stick model of NPP by OpenSEES program [9]

면진을 적용하기 위하여 필요한 면진장치 개수는 486개이지만 간략화된 Beam-Stick 모델에서는 해석에 소요되는 시간을 단축시키기 위해서 83개의 면진장치로 개수를 축소하여 배치하였고 83개의 면진장치가 실제 486개의 면진장치와 동일한 면진효과를 나타내도록 간략화된 Beam-Stick 모델의 1개의 면진장치는 Table 2에 나타난 면진장치의 5.85개의 역할을 할 수 있도록 역학적 성질을 등가로 치환하여 적용시켰다. LRB의 비선형 해

Table 3. Mechanical property of LRB used in this study

Model Parameter	2 node model (per each unit)	Beam-Stick Model (per 5.85 unit)
K_u (elastic stiffness)	$3.191 \times 10^6 \text{ kN/m}$	$544.77 \times 10^3 \text{ kN/m}$
K_d (second-slope stiffness)	$2.494 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$4.26 \times 10^3 \text{ kN/m}$
Q_d (characteristic strength)	$5.865 \times 10^3 \text{ kN}$	$1.046 \times 10^3 \text{ kN}$



석모델은 이선형모델(bilinear model)을 사용하였으며 LRB는 설계목표 변위에 대하여 등가선형모델의 주기가 약 2 초가 되도록 설계하였다. 2절점 모델과 간략 Beam-Stick 모델에 사용된 LRB 면진장치의 1차 강성(K_u), 2차 강성(K_d), 특성 강도 (Q_d)의 역학적 성질은 Table 3에 나타내었다. 2절점 모델은 간단하지만 OpenSEES 프로그램의 LeadRubber-X 모듈[6]을 적용하여 내부 온도 상승 영향 등 면진장치의 상세한 응답특성을 분석하는데 사용하였다. LeadRubber-X 모듈은 LRB 면진장치의 외경, 내경, 고무 두께, 층의 개수 등 상세한 모델링 정보를 사용하여 LRB 면진장치의 내부 온도 상승에 관한 영향 뿐 아니라 인장력에 의한 공동현상, 횡변위에 따른 좌굴영향까지 고려할 수 있다. Kalpakidis 등의 연구[7]를 참고하여 납의 밀도는 $11,200 \text{ kg/m}^3$, 납의 비열은 $130 \text{ J/kg}^\circ \text{C}$, 철판의 열전도율은 $50 \text{ W/m}^\circ \text{C}$ 로 사용하였다.

4. 면진된 원전구조물의 지진응답 비교

4.1 면진장치의 비선형 거동에 의한 온도상승효과 분석

지진에 의한 LRB 면진장치의 비선형 반복운동은 납의 소성거동에 의하여 내부 온도를 상승시키며 이러한 온도 상승은 LRB 면진장치의 항복강도를 저하시키며 면진장치의 항복강도저하는 변위응답을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 경주지진에 대한 면진장치의 온도상승 효과를 분석하기 위하여 LRB 시간에 따른 내부온도 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 관측소 별로 온도 상승에 따른 최종온도는 DKJ는 0.39°C , MKL은 0.81°C , USN은 1.18°C 로 나타났으며 결과적으로 면진장치의 내부온도 상승은 크지 않음을 알 수 있다. PGA 0.3 g의 원전표준설계스펙트럼에 대응하여 생성된 30개 인공지진에 대한 LRB 면진장치의 내부온도를 Fig. 9에 나타내었으며 평균적으로 11.26°C 의 온도 상승이 발생함을 알 수 있다. Fig. 9의 가로축의 숫자는 사용된 30개 인공지진의 일련번호를 나타낸다. Fig. 9에서 경주지진은 관측소의 영문명으로 나타내었다. 경주지진과 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지

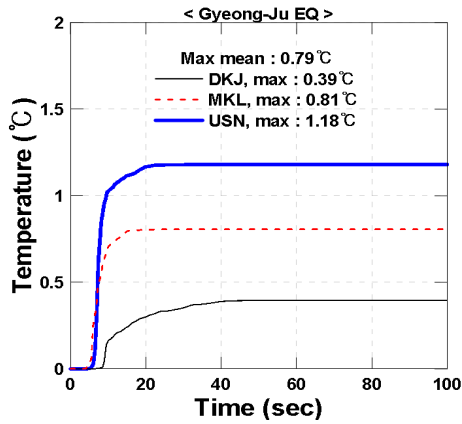


Fig. 8. Comparison of lead core's temperature time history of LRB subjected to Gyeong-Ju earthquake

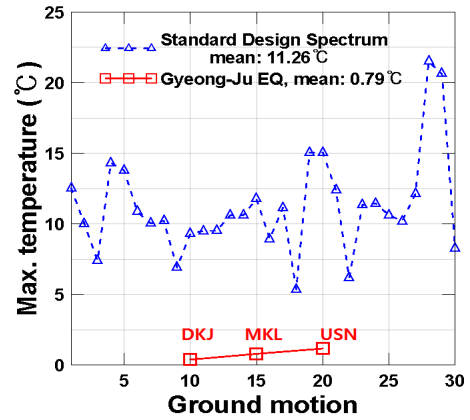


Fig. 9. Comparison of lead core's maximum temperature of LRB subjected to Gyeong-Ju earthquake and 30 set artificial earthquakes corresponding to standard design spectrum

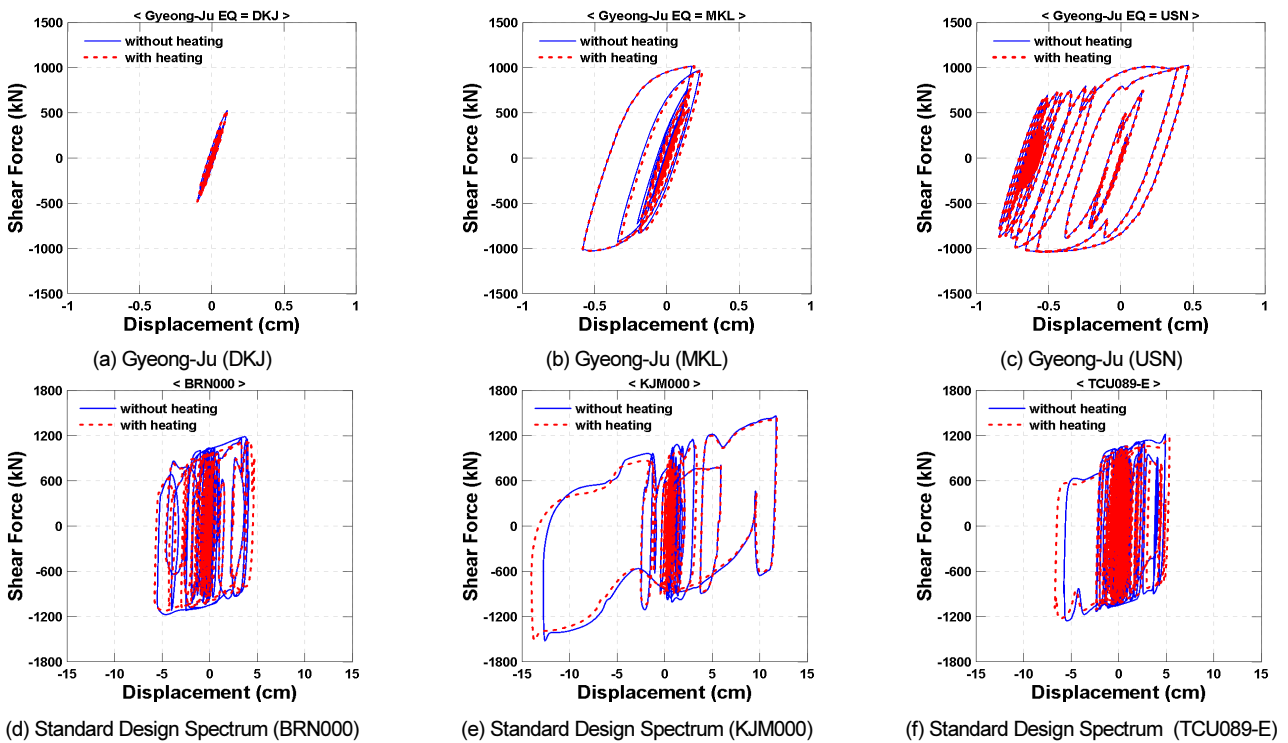


Fig. 10. Comparison of force-displacement relationships of LRB due to heating effect.

진의 결과의 비교로부터 경주지진은 규모는 큰 편이지만 강진지속시간이 3 초로 매우 짧아 면진장치의 내부온도 상승에 영향을 크게 미치는 반복거동의 횟수가 매우 적어 면진장치 내부온도 상승이 원전표준스펙트럼 대응 인공지진보다 10% 미만 수준으로 작게 나타났다고 판단된다.

면진장치 내부온도의 상승은 전단강도의 저하를 일으키며 전단강도 저하는 면진장치의 횡변위를 증가시키고 증가된 횡변위는 수직강성의 저하로 일반적으로 야기한다.

면진장치의 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 힘-변위응답을 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a), (b), (c)는 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 경주지진에 대한 LRB의 힘-변위 관계이며, Fig. 10(d), (e), (f)는 원전 표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진 30개 중에서 선별한 3개의 힘-변위

관계를 나타낸다. Fig. 10(a)는 DKJ 관측소에서 측정된 경주지진으로 최대 변위가 1 mm로 면진장치의 항복변위인 1.88 mm 보다 작은 변위를 보이며 항복변위를 넘지 않아 탄성거동 범위에 머무르는 것으로 나타났다. Fig. 10(b)와(c)는 항복변위를 넘어 비탄성 응답을 하였다. 하지만 납심의 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 힘-변위 관계의 차이는 무시할 정도로 작게 나타났다. Fig.10(d), (e)와(f)는 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 전단강도 저하와 이에 따른 횡변위의 증가현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

전단강도(또는 항복강도)저하는 반복거동에 의한 비탄성 힘-변위 응답의 횟수가 많아질수록 내부온도 상승에 따른 영향으로 누적적으로 감소하는 경향을 나타낸다. LRB의 내부 온도 상승에 따른 전단강도의 감소정도를 초기 전단강도에 대한 감소된 전단강도의 비로서 Fig. 11(a)에 비교하여 나타내

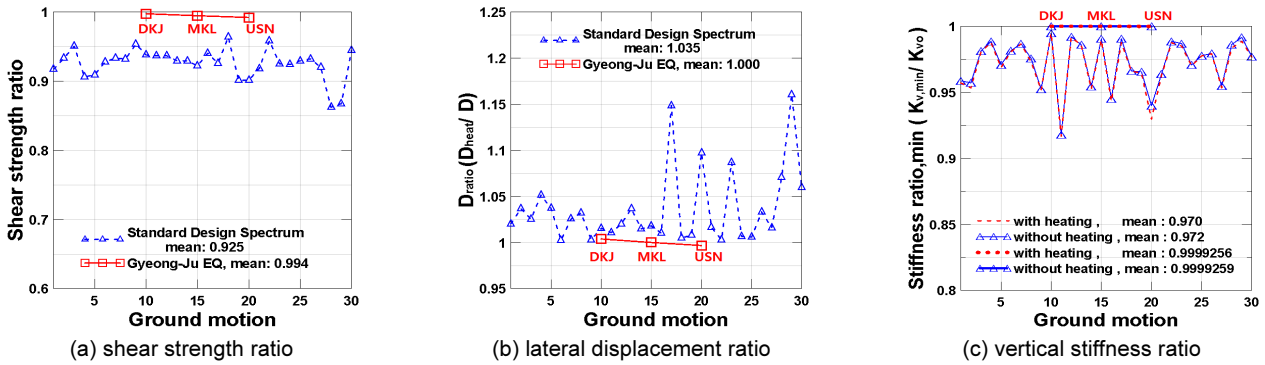


Fig. 11. Comparison of inelastic responses of LRB due to heating effect

었다. 전단강도비를 구할 때 면진장치의 횡변위가 발생하기 이전의 전단강도를 초기전단강도로 하였고, 온도상승에 의해 최종적으로 감소된 전단강도값을 전단강도비를 구하는데 사용하였다. 여기서 전단강도비가 1은 전단강도의 저하가 발생하지 않음을 의미한다. 1보다 작을수록 전단강도가 비탄성응답에 의한 온도상승에 의하여 많이 저하되었음을 의미한다. Fig. 11(a)의 점선으로 표현한 것은 원전표준설계지진의 30개의 전단강도비를 나타낸 것이며 그래프내의 실선은 경주지진의 전단강도비를 나타낸 것이다. PGA 0.3 g 원전표준설계스펙트럼의 경우 평균적으로 0.925의 전단강도비(약 7.5% 전단강도 감소)를 나타내며 보이며 경주지진의 경우 전단강도비가 0.9945(약 0.55% 전단강도 감소)로 전단강도가 거의 발생하지 않음을 나타낸다. 경주지진의 경우에 전단강도비는 내부온도 상승이 거의 없는 특성과 관련하여 전단강도감소 또한 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

LRB의 내부온도 상승에 의한 전단강도 저하는 LRB의 횡변위에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 온도상승 효과의 반영유무에 따른 LRB의 횡방향 변위응답의 비($D_{ratio} = D_{heat}/D$)를 Fig. 11(b)에 비교하여 나타내었다. D 는 내부온도 상승효과를 고려하지 않은 경우의 LRB의 최대변위를 나타내며 D_{heat} 는 내부온도 상승효과를 고려한 경우의 LRB의 최대변위를 나타낸다. Fig. 11(b)에서 점선은 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 30개의 인공지진에 대한 LRB의 변위비를 나타내며, 실선은 경주지진에 대한 변위비를 나타낸다. 변위비(D_{ratio})가 1보다 큰 값을 나타내는 것은 면진장치의 해석에서 온도상승 효과를 반영한 경우의 변위가 온도상승효과를 반영하지 않은 경우에 비하여 횡변위가 증가하였음을 의미한다. 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진을 사용한 경우 내부 온도상승 영향을 고려하지 않은 경우에 비하여 내부 온도상승을 고려한 경우의 횡변위가 평균적으로 3.5% 증가함을 알 수 있다. 경주지진에 대해서는 온도상승효과가 크지 않기 때문에 이에 따른 횡변위의 증가도 무시할 정도이다.

LRB와 같은 고무계열 면진장치는 횡방향 변위가 증가할수록 횡방향 전단변형에 따른 수직하중을 지지할 수 있는 면적이 감소되므로 수직강성이 감소한다. 횡방향 변위가 발생하기 이전에 초기의 수직강성에 대한 횡방향 변위응답으로 인해 감소된 최소수직강성의 비를 수직강성비로 정의하고 이를 구하여 Fig. 11(c)에 나타내었다. 1의 수직강성비는 횡변위에 의한 수직강성의 변화가 없음을 의미한다. 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진의 경우에 수직강성비는 평균 0.970로서 3% 정도 감소가 되었음을 알 수 있고, 경주지진의 경우에는 수직강성비의 평균이 0.9999256으로서

횡변위에 의한 수직강성의 감소가 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2 간략 Beam-Stick 모델을 이용한 면진된 원전구조물의 지진 응답 비교

본 연구에서 2절점 모델(Fig. 6 참조)은 면진장치 하나에 대한 정밀해석을 위하여 사용하였고, 면진된 원전구조물의 전반적인 지진응답을 분석하기 위해서는 간략화된 Beam-Stick 모델(Fig. 7 참조)을 사용하였다.

경주지진에 대한 면진된 원전 격납구조물의 변위, 가속도, 전단력을 구조물의 높이에 따라 각각 Fig. 12(a), (b)와 (c)에 나타내었다. 원전표준스펙트럼에 대응하는 30개 인공지진에 대한 면진된 원전 격납구조물의 변위, 가속도, 전단력을 Fig. 12(d), (e), (f)에 나타내었다. 굵은 실선은 30개 응답의 평균값을 의미한다. 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지진 30개와 3가지 경주지진에 대한 격납구조물의 변위, 가속도, 전단력의 평균을 비교하여 Fig. 12(g), (h)와 (i)에 비교하여 나타내었다.

Fig. 12(g)에 나타난 면진격납구조물의 평균 변위응답으로부터 경주지진에 의한 면진장치의 변위응답은 10 mm 미만으로 나타나고 원전 표준 설계스펙트럼 대응 인공지진에 대해서는 약 70 mm의 변위응답을 나타낸다. 격납구조물의 바닥 층과 꼭대기 층의 상대 변위는 DKJ는 2.82 mm, MKL은 10.47 mm, USN은 14.57 mm로 평균 9.29 mm의 상대 변위를 가지므로 나타났으며 이는 원전표준설계스펙트럼 30개의 평균 7.42 mm와 비슷한 수준을 나타낼 수 있다.

Fig. 12(b)에 나타난 경주지진에 대한 격납구조물의 높이에 따른 가속도 응답으로부터 최상층의 가속도가 DKJ, MKL과 USN 경우에 각각 0.274 g, 0.767 g, 1.054 g이며 평균 0.678 g임을 알 수 있다. 원전표준설계스펙트럼 대응하는 30개 지진의 최상층 가속도 평균값은 Fig. 12(e)에 나타난 바와 같이 1.05 g로서 경주지진에 의한 최상층의 가속도가 원전표준스펙트럼에 대응하는 지진의 경우보다 작게 나타남을 알 수 있다.

경주지진에 대한 격납구조물의 높이에 따른 전단력을 Fig. 12(c)에 나타내었다. 밀면 전단력의 크기는 DKJ, MKL, USN 각각 27.202 MN, 95.909 MN, 161.017 MN으로 나타났으며 평균 94.709 MN으로 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 30개 인공지진의 밀면 전단력의 평균 154.18 MN 보다 작게 나타났다. 3가지 경주지진에 대한 지진응답의 평균값은 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지진에 대한 지진응답의 평균값 보다 작게 나타나고 있어서 경주지진이 규모에 비하여 면진된 원전구조물에 미치는 영향이 작다고

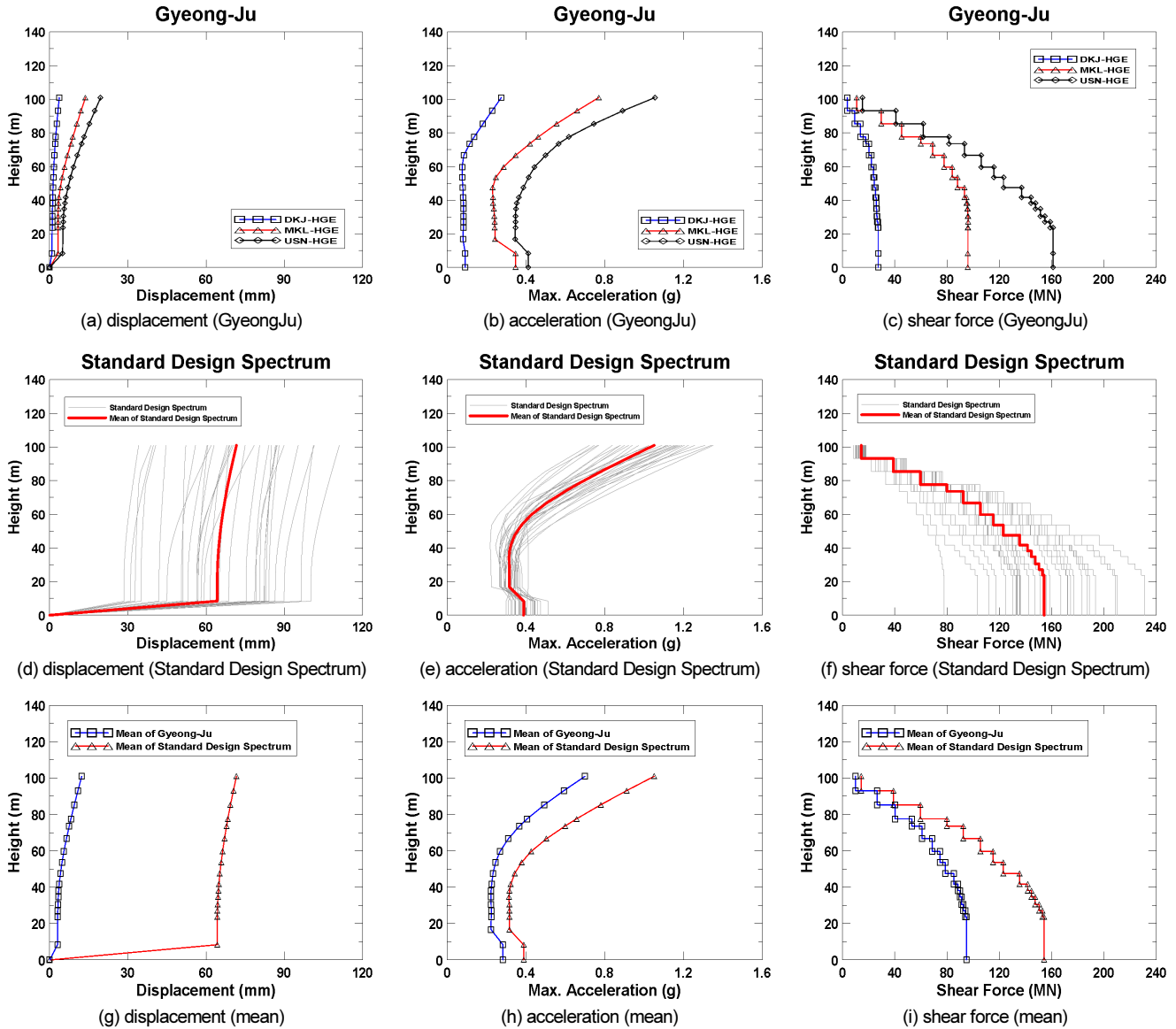


Fig. 12. Comparison of seismic responses of NPP containment structure subjected to Gyeong-Ju earthquake and 30 set artificial earthquakes corresponding to standard design spectrum

할 수 있다. 그러나 PGA가 가장 작게 관측된 DKJ 지진을 제외하고 MKL, USN에서 관측한 2지진의 지진응답은 원전표준설계스펙트럼의 대응하는 인공지진 30개의 평균응답과 비교해 보면 비슷한 수준이거나 약간 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

지반으로부터 전해지는 지반가속도는 면진장치를 거치면서 가속도 값이 작아지는 것일 일반적이다. 지반으로부터 전해지는 지반가속도에 대한 면진 장치 위에 위치한 상부매트에서의 가속도의 비를 구하여 이를 가속도비로 나타내어 Fig. 13에 나타내었다. 가속도비가 1보다 작을수록 면진장치가 상부에 전달하는 가속도를 효과적으로 저감시킴을 나타낸다. 경주지진에 대한 가속도비가 0.803이고 원전표준스펙트럼에 대응하는 지진에 대한 가속도비가 0.829로서 비슷한 결과를 나타낸다. 면진장치에 의한 가속도 저감효과는 경주지진에 대하여 약 20%, 원전표준설계스펙트럼에 대하여 가속도 저감효과가 약 17%로 나타났다. 이는 Table 2에 나타낸 면진장치가 외국의 강진지역 (PGA 0.5 g 수준)에 대하여 설계되었기 때문에 이 보다 PGA가 작은 경우에

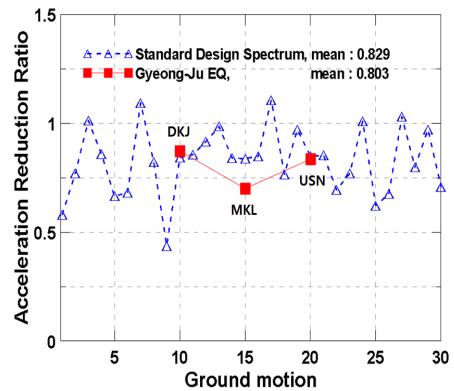


Fig. 13. Comparison of acceleration reduction ratio at mat

는 가속도 저감효과가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 면진장치를 PGA 0.3 g 수준으로 설계하여 사용한다면 횡방향 강성이 보다 유연한 것을 사용

할 것이므로 가속도 저감효과가 향상되리라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 경주지진에 대한 면진된 원전구조물의 지진응답을 평가하여 위하여 PGA 0.3 g 수준의 원전표준설계스펙트럼에 대응하는 인공지진 30세트에 의한 지진응답과 비교하였다. 지진응답의 비교를 위하여 2절점 모델과 간략Beam-Stick 모델을 사용하였다. 2절점 모델을 이용하여 면진장치의 온도효과 반영유무에 따른 전단강성의 감소정도, 횡방향 변위 응답의 증가정도, 수직강성의 감소정도를 정밀해석을 통하여 평가하였다. 또한 간략화된 Beam-Stick 모델을 이용한 면진된 격납구조물의 변위, 가속도, 전단력 응답을 격납구조물의 높이에 따라 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경주지진의 가속도 응답 스펙트럼 분석 결과 0.1 초 주기 부근에서 최대치를 나타내며 0.2 초 이후 주기영역에서는 가속도 응답스펙트럼이 급격하게 감소되는 것을 알 수 있었다. 단주기 영역에서의 응답스펙트럼의 값이 크게 나타남을 알 수 있으며 강진지속 시간은 3초 정도로 짧아서 최대지반가속도에 크기에 비하여 구조물의 비탄성 응답에 미치는 영향은 작게 나타남을 알 수 있다.
- 2) LRB 면진장치의 내부온도가 상승함에 따라 전단강도가 작아지며 작아진 전단강도의 영향으로 LRB 면진장치의 횡변위가 증가한다. 또한 횡변위의 증가는 수직강성에 영향을 미쳐 수직강성의 저하로 이어지는 것을 2절점 모델을 이용하여 해석결과로부터 확인하였다. 이러한 경향은 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지진에 대하여는 뚜렷하게 나타나지만 경주지진의 경우에는 비탄성 응답의 정도가 미미할 정도로 작기 때문에 이러한 경향이 무시할 정도로 작게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 간략 Beam-Stick 모델을 이용하여 격납구조물의 높이에 따른 변위 응답, 가속도 응답, 전단력 응답을 경주지진과 원전표준스펙트럼에 대응하는 인공지진에 대하여 분석한 결과로부터 경주지진에 의한 지진응답이 원전표준스펙트럼에 대한 경우보다 작게 나타남을 알 수 있었다. 두 지진에 대한 면진장치의 비선형 거동의 차이는 경주지진의 경우에 비탄성 거동이 미미하여 뚜렷하게 나타났지만 격납구조물의 가속도와 전단력의 경우는 원전표준스펙트럼에 비하여 작게 나타났지만 면진장치의 비탄성 응답의 차이 보다는 크지 않았다.
- 4) 면진장치에 의한 가속도 저감효과는 경주지진에 대하여 약 20%, 원전표준설계스펙트럼에 대하여 가속도 저감효과가 약 17%로 나타났다. 이는 본 연구에 사용한 면진장치가 외국의 강진지역(PGA 0.5 g 수준)에 대하여 설계되었기 때문에 이보다 PGA가 작은 경우에는 가속도 저감효과가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 면진장치를 PGA 0.3 g 수준으로 설계하여 사용한다면 보다 횡방향 강성이 보다 유연한 것을 사용할 것이므로 가속도 저감효과가 보다 향상되리라 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을

받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2015R1D1A3A01020276)임. 또한 이 연구는 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520160272).

/ REFERENCES /

1. Lee JH, Song JK, Multi-Step Analysis of Seismically Isolated NPP Containment Structures with Lead-Rubber Bearings, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2014;18(6):261-269.
2. 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.
3. Lee JH, Song JK, Seismic Fragility Analysis of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structures using Equivalent Linear- and Bilinear Lead Rubber Bearing, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2015;19(5):207-217.
4. Abrahamson, NA, Non-stationary spectral matching, Seismol. Res. Lett., 63, 30, c1992.
5. Atik LA, Abrahamson N, An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, Earthquake Spectra, 2010;26(3):601-617.
6. Yang KK, Song JK, Inelastic Response Evaluation of Lead-Rubber Bearing Considering Heating Effect of Lead Core, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2016;20(5):311-318.
7. U.S. Nuclear Regulatory Commission, A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion, Regulatory Guide(RG) 1.208, c2007.
8. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Regulatory Guide(RG) 1.60, c1973.
9. 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>), c2007.
10. Kumar M, Whittaker A, Constantinou M, Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking, Nuclear Engineering and Design, 2015;295:860-874.
11. Kim BS, Song JK, Seismic Responses of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure Considering Post-Yield Stiffness of EQS Bearing, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2016;20(5):319-329.
12. Kumar M, Whittaker A, Constantinou M, An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014;43:1955-1974.
13. Kumar M, Whittaker A, Constantinou M, Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking, Nuclear Engineering and Design, 2015;295:860-874.
14. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft), c2012.