

EQS 면진장치의 항복 후 강성을 고려한 면진 원전구조물의 지진응답

Seismic Responses of Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure Considering Post-Yield Stiffness of EQS Bearing

김병수¹⁾ · 송종걸^{1)*}

Kim, Byeong-Su¹⁾ · Song, Jong-Keol^{1)*}

¹⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The Eradi Quake System (EQS) is a seismic isolation bearing system designed to minimize forces and displacements experienced by structures subjected to ground motion. The EQS dissipates seismic energy through friction of Poly Tetra Fluoro Ethylene (PTFE) disk pad. In general, a force-displacement relationship of EQS has post yield stiffness hardening during large inelastic displacement. In this study, seismic responses of seismically isolated nuclear power plant (NPP) subjected to design basis earthquake (DBE) and beyond design basis earthquakes (150% DBE and 167% DBE) are compared considering the post yield stiffness hardening effect of EQS. From the results, it can be observed that if the post-yield stiffness hardening effect of EQS is increased, the displacement response of EQS is reduced, and the acceleration and shear responses of containment structures of NPP is increased.

Key words: Eradi Quake System (EQS), Seismic isolation, Post-yield stiffness hardening, Design basis earthquake, Beyond design basis earthquake

1. 서론

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침(Eradi Quake System, EQS)은 국내·외에서 교량의 면진장치로 주로 사용되고 있다. EQS의 동적거동에 영향을 미치는 구성 재료의 특성에 대한 분석을 수행한 후, 그 결과를 이용하여 면진시스템의 거동을 예측하여 거동 시험결과와 비교한 기존 연구사례[1]가 있다. 이 연구에서 면압과 속도에 따른 마찰계수와 변형률에 따른 폴리우레탄 스프링의 탄성계수는 시험결과로부터 역추정하여 사용하였다 [1]. ICT 센터 사례연구를 통한 EQS의 건축구조물 면진에 대한 적용 연구 [2]에서는 EQS는 설계 시 불소수지판(Poly Tetra Fluoro Ethylene, PTFE)의 면압 및 폴리우레탄 스프링 강성이 주요 설계변수가 되며, 이 변수에 따른 구조물의 응답 변화에 관한 내용을 분석하였다. 원전 EQS 면진장치의 성능개선을 위한 연구[3]에서는 기존의 교량 및 구조물에 사용되어 온 EQS 면진장치보다 원전 적용에 필요한 EQS는 더 높은 품질과 설계의

유연성 및 신뢰성을 필요로 하기 때문에, 기존 EQS 면진장치에서 발생하는 미복원성 부분을 개선하였으며 설계의 신뢰성 향상을 위해 면진장치의 이력 거동에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 거동을 정확히 예측할 수 있는 설계용 해석프로그램인 EAP(EQS Analysis Program)를 개발하였다. 국내에는 최근에 원전에 EQS 면진장치를 적용하기 위한 목적으로 EQS의 성능 및 적용성 향상에 대한 연구가 수행되어 오고 있으며, 본 연구도 이러한 배경으로부터 EQS 면진장치 해석모델의 고도화에 따른 원전구조물의 거동분석의 차이를 평가하려는 목적으로 수행하였다.

EQS의 해석 시에 이선형(bilinear) 모델을 사용하는 것이 일반적이지만 EQS의 이력응답의 특성상 변위응답이 어느 정도 이상이면 항복 후 강성이 증가하여 비선형 경화현상이 발생하므로 이선형 모델로는 실제 EQS의 동적응답을 나타내기에는 부적절하다. 그러므로 본 연구에서는 EQS의 비선형 항복 후 강성의 경화 특성을 고려한 모델을 사용하여 비선형 강성의 경화 정도에 따른 면진된 원전구조물의 지진응답을 분석하는 것이 연구의 목적이다. EQS를 이선형으로 모델링하여 해석한 경우에 비하여 EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화 특성을 반영한 정도에 따라 구조물의 응답을 비교하였다. 즉, EQS를 위한 비선형 해석모델 중에서 기존의 이선형 모델에서는

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received May 16, 2016; Revised July 14, 2016; Accepted July 21, 2016)

반영할 수 없는 항복 후 강성의 비선형 경화현상의 고려유무 및 비선형 경화 정도에 따른 지진응답의 영향을 분석하였다. EQS의 비선형 경화특성의 증가에 따라 구조물의 전단력과 가속도는 이선형 모델을 적용한 경우 보다 증가하는 것을 알 수 있으며, 반대로 구조물의 변위는 감소함을 알 수 있다.

2. EQS 면진장치의 면진거동의 특성

EQS의 구조는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 폴리우레탄 스프링, 불소수지판(PTFE)과 디스크 패드로 구성되어 있다. 폴리우레탄 재질의 디스크 패드는 지중에 의한 연직하중을 지지하고 진동을 감쇠시키며 회전변위도 수용한다. 불소수지판은 지진하중의 반복운동에 따른 감쇠기능을 가지며 마찰에 의해 운동방향 반대방향으로 저항하는 원리에 의해 지진에너지를 소산시킨다. 폴리우레탄 스프링은 지진에 의한 변위응답의 종료 후 내부 구조체와 불소수지판을 원래의 위치로 복원시키는 기능을 하며 또한 면진 장치의 항복 후 강성(2차 강성)의 크기를 결정하는 역할을 한다. 본 연구에서 사용된 EQS의 제원은 불소수지판의 외경이 770 mm, 폴리우레탄 스프링의 외경과 내경, 길이는 각각 147 mm, 48 mm, 313 mm 이며, 폴리우레탄 스프링은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 면진장치의 측면에 2개씩 부착하였다.

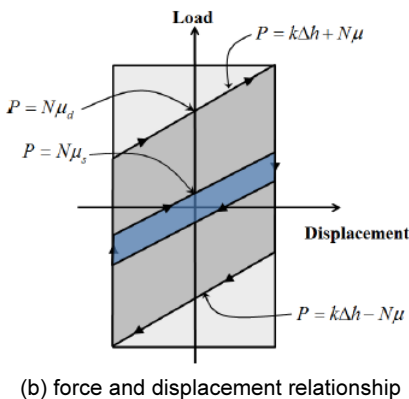
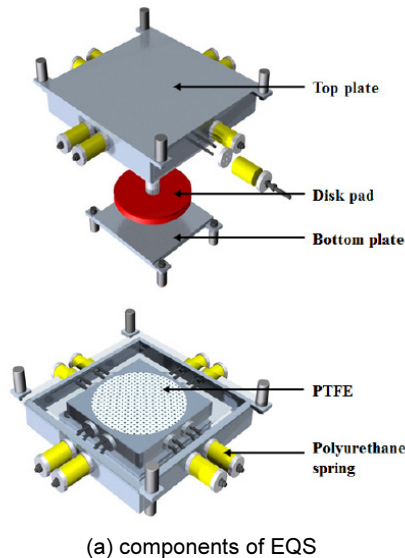


Fig. 1. Configuration of EQS[2]

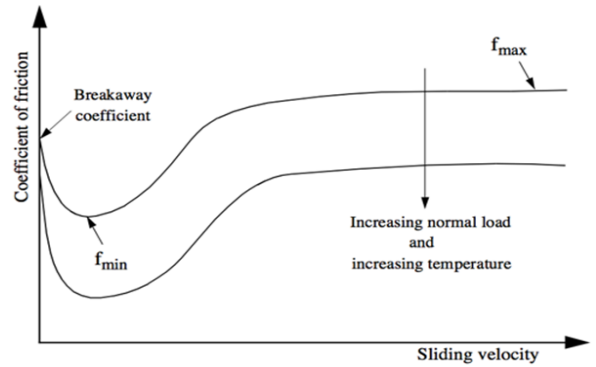


Fig. 2. Velocity-dependent friction coefficient according to sliding velocity [3]

Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 EQS의 거동을 나타내는 힘-변위 관계에서 EQS의 전단력(P)은 폴리우레탄 스프링의 강성(k)과 변위(Δh)의 곱과 연직하중(N)과 마찰계수(μ)의 곱을 합하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$P = k\Delta h \pm N\mu \tag{1}$$

여기서, k 는 폴리우레탄 스프링의 강성, Δh 는 폴리우레탄 스프링의 압축 변위, N 은 연직하중, μ 는 마찰계수이다.

EQS의 전단력(P)은 식 (1)에 나타난 바와 같이 폴리우레탄 스프링에 의한 것과 마찰에 의한 것으로 구분할 수 있다. 이 중 마찰에 의한 힘-변위 관계는 두 가지 경우로 구분할 수 있는데 저속 마찰계수(μ_s)일 경우는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 면적이 작은 힘-변위 관계를, 고속 마찰계수(μ_d)일 경우는 면적이 큰 힘-변위 관계를 나타낸다. 이는 EQS는 마찰계열 면진 장치이므로 마찰계수에 따라 면진장치의 힘-변위 응답이 영향을 받음을 의미한다. 마찰계수는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 마찰속도와 면진장치에 작용하는 수직하중의 크기(면압)에 따라 변한다. EQS는 지진과 같이 고속 거동이 발생할 경우에는 고속마찰계수의 영향을 지배적으로 받으며 그 이외의 풍하중 등과 같은 저속의 응답을 유발하는 경우에는 저속마찰계수의 지배적인 거동을 나타낸다.

3. EQS가 적용된 면진 원전구조물의 지진응답 분석

3.1 예제 원전구조물

본 연구에 사용된 원전 구조물은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 SASSI 2000[4]의 예제모델을 사용하였고, 상부구조물은 집중질량 보요소로 모델링하였으며, EQS를 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 원형 밀면매트의 하부에 원형을 이루도록 37개를 배치하였다.

면진된 원전의 지진해석은 구조해석 프로그램인 OpenSEES(Open System for Earthquake Engineering Simulation)[5]를 사용하였으며 OpenSEES를 이용한 해석모델의 형상을 Fig. 3(b)에 나타내었다.

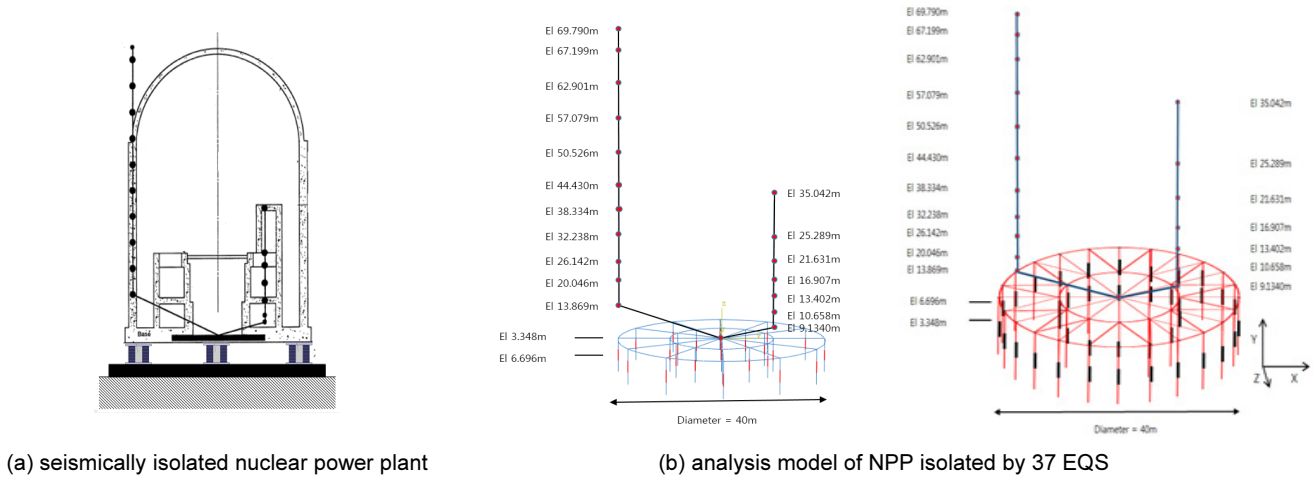


Fig. 3. Analysis model of seismically isolated nuclear power plant

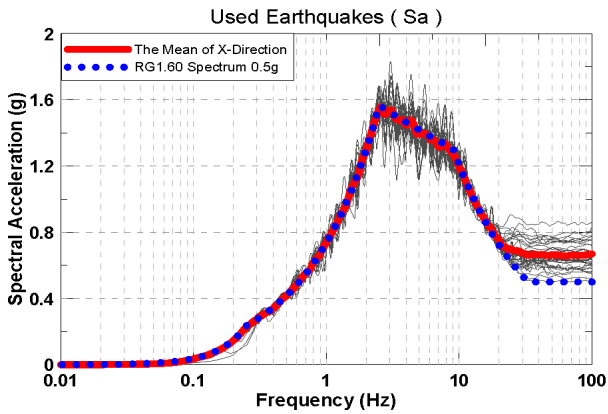


Fig. 4. Comparison of acceleration response spectrum of 30 set artificially generated records by RspMatch according to R.G. 1.60 Spectrum

3.2 원전구조물에 대한 입력지진

입력지진은 면진원전 성능검증 기준을 검토하기 위해 RspMatch 프로그램[6]을 이용하여 R.G. 1.60 설계응답스펙트럼[7]에 부합되도록 작성한 세 방향 지진기록 30개 세트를 사용하였다. 여기서 설계응답스펙트럼의 영주기 가속도(ZPA)는 강진지역을 반영하기 위하여 0.5 g가 되도록 하였다. 30 세트의 수평방향(Fig. 3(b)에 나타난 X방향) 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 20 Hz 이상의 고진동수 영역을 제외하고는 R.G. 1.60 설계응답스펙트럼에 잘 부합하는 응답스펙트럼이 생성됨을 알 수 있다[8].

4. EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 고려한 면진된 원전구조물의 지진응답 분석

4.1 EQS의 비선형모델을 위한 주요해석인자 평가

EQS의 힘-변위 관계의 비선형모델은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 정의되

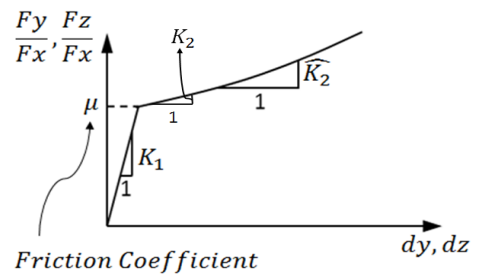


Fig. 5. Nonlinear modeling of EQS

며 1차 강성(K_1)은 다음의 식으로 정의된다.

$$K_1 = \frac{F_y}{D_y} \quad (2)$$

여기서, F_y 는 항복 강도, D_y 는 항복 변위를 나타낸다.

EQS의 항복후 강성인 2차 강성(K_2)은 다음의 식으로 정의된다.

$$K_2 = K_s N_s \quad (3)$$

여기서, K_s 는 측면 폴리우레탄 스프링의 강성, N_s 는 측면 폴리우레탄 스프링의 개수를 나타낸다. K_s 는 다음과 같이 구한다.

$$K_s = \frac{E(1+S_f^2)A}{L} \quad (4)$$

여기서, E 는 폴리우레탄 스프링의 압축탄성계수, S_f 는 폴리우레탄 스프링의 형상계수, A 는 폴리우레탄 스프링의 단면적, L 은 폴리우레탄 스프링의 길이를 나타낸다. S_f 는 다음과 같이 구한다.

$$S_f = \frac{D_o - D_i}{4h} \quad (5)$$

여기서, D_o 는 폴리우레탄 스프링의 외경, D_i 는 폴리우레탄 스프링의 내경,

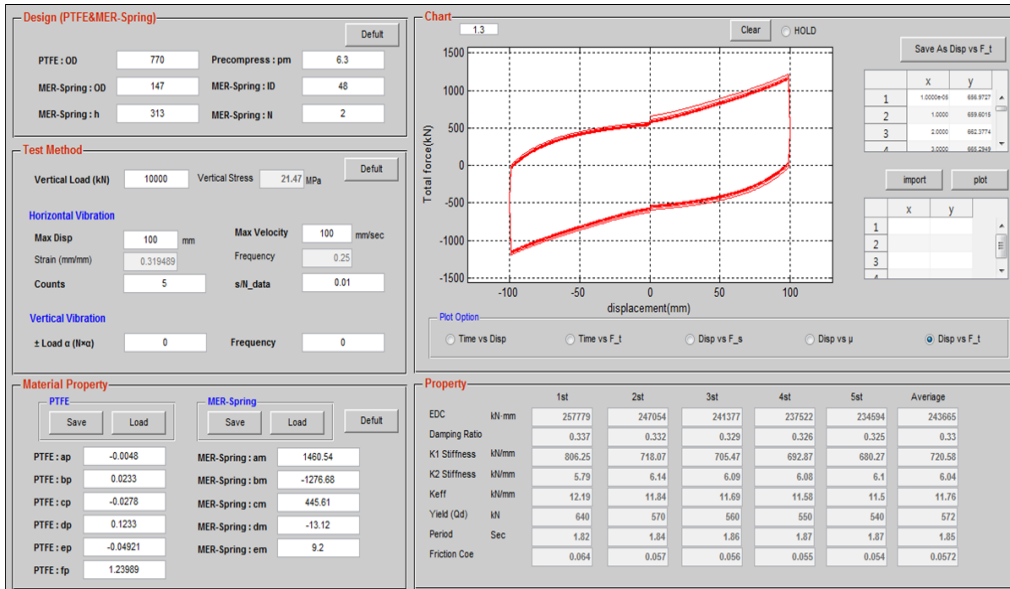


Fig. 6. Execution window of EAP (EQS Analysis Program)

h 는 폴리우레탄 스프링의 길이로 나타낸다.

EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화를 반영한 2차 강성(\hat{K}_2)의 크기는 다음의 식으로 정의된다.

$$\hat{K}_2 = K_2 + K_3 \eta |d_y|^{n-1} \quad (6)$$

여기서, \hat{K}_2 는 측면 폴리우레탄 스프링에 의한 비선형 경화특성이 반영된 항복 후 강성, K_2 는 비선형 경화특성이 반영되지 않은 항복 후 강성, K_3 는 측면 폴리우레탄 스프링의 비선형 경화특성 계수, η 는 비선형 경화성분의 지수로서 1보다 큰 상수를 사용하였다. d_y 는 항복 변위를 나타낸다.

EQS의 비선형 응답특성을 구하기 위하여, Matlab 코드로 작성된 EQS 해석 프로그램(EQS Analysis Program)인 EAP를 이용하였다[9]. EQS 면진 장치의 거동에 있어 동적 특성을 결정하는 인자로는 두 가지가 있다. 첫째로는 불소수지판에 의한 마찰이고 둘째로는 폴리우레탄 스프링의 강성이다. EQS의 동적 특성을 결정하는 두 가지 인자는 시험결과 및 분석을 활용한 EAP를 통해서 구해진다[1]. EAP는 동적시험 결과로부터 구해진 EQS의 비선형 거동특성으로부터 비선형 해석모델의 주요 인자를 도출하는데 사용된다. 본 연구에서 적용한 마찰계수는 EAP에서 도출된 마찰계수를 사용하였으며 그 값은 0.0568이다. 이와 같은 EAP의 해석과정의 예를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 EAP 실행창의 오른쪽 하단부의 “Property” 부분에 EQS의 해석모델의 주요인자인 감쇠비, 초기강성(K_1), 항복 후 강성(K_2), 항복력(Q_d) 등이 동적시험 결과로부터 계산되어 산출된다.

Fig. 3에 나타낸 면진 원구조물에서 EQS가 받는 평균 수직하중(면압)을 적용하여 EQS의 비선형 해석모델의 주요인자인 1차강성(K_1), 2차강성(K_2), 유효강성(K_{eff})이 각각 $K_1 = 721,490$ kN/m, $K_2 = 6,050$ kN/m, $K_{eff} = 11,776$ kN/m로 EAP에 의해 계산되었다. EQS에서 비선형 경화특성의 주요인자인 식(6)의 K_3 의 경우, EAP에서 따로 계산되어지지 않으므로 EAP와 동일한 반복하중(triangular wave 형태의 반복하중)을 이용하

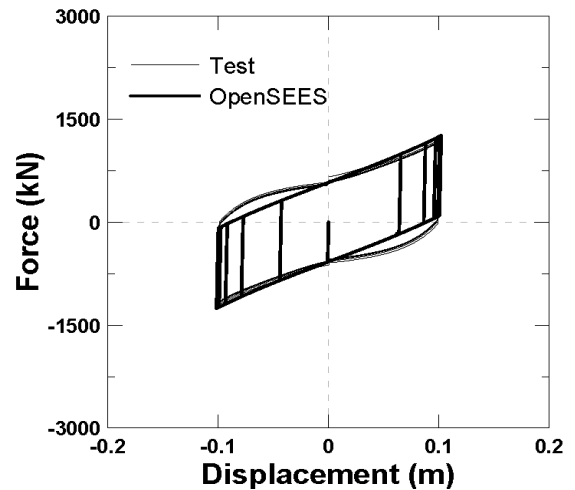


Fig. 7. Comparison of force-displacement relationship of EQS by experimental test and OpenSEES program

여 OpenSEES 프로그램을 이용하여 구하였다. 실험결과로부터 구한 힘-변위관계와 OpenSEES 프로그램에서 임의의 K_3 를 이용한 힘-변위관계를 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 비교하여 두 결과가 유사해질 경우의 K_3 를 해석에 사용한다. 본 연구에 사용한 EQS의 K_3 의 값은 60,500 kN/m이다.

구조물의 면진을 고려한 EQS의 설계 시에 지진에 의한 면진장치의 허용변위에 적합한 폴리우레탄 스프링 길이를 결정할 후에 S_f 와 A 를 조절하는 방법을 사용하여 이를 통하여 2차 강성 K_2 를 결정한다. Fig. 7에서 제2사분면과 제4사분면의 힘-변위 관계가 OpenSEES의 해석모델과 EAP에 적용된 시험결과와의 차이를 나타낸다. 정대우의 논문[10]에서 제2사분면과 제4사분면의 응답차이를 감쇠효과의 차이로 언급하고 있지만 명확한 분석결과는 아니며 분명한 원인분석이 필요하다고 판단된다. 이러한 응답 차이가 실험측정 방식 또는 실험에 사용된 EQS의 재료 특성에 따른 것인지 명확하지 않으며 이를 규명하기 위한 추가 연구가 필요한 상황이다.

4.2 EQS의 비선형 경화 특성의 변화에 따른 구조물의 응답 비교

항복 후 강성의 비선형 경화특성(\hat{K}_3)에 따른 EQS의 거동차이를 분석하기 위하여, K_3 의 크기는 비선형 경화가 발생하지 않은 경우($K_3 = 0 \text{ kN/m}$), Fig. 7의 시험결과로부터 구한 K_3 를 사용하는 경우($K_3 = 60500 \text{ kN/m}$)와 시험결과에 따른 경화특성의 중간정도를 가지는 경우($K_3 = 30250 \text{ kN/m}$)의 세 가지 경우로 정하여 비교하였다. 세 가지 경우의 K_3 에 대한 EQS의 지진하중에 대한 힘-변위 거동 특성을 비교하였으며, 이에 따른 원전 구조물의 지진응답을 비교하여 분석하였다.

원전 표준응답스펙트럼에 대응하도록 생성된 입력지진들에 대한 EQS의 힘-변위 응답을 비선형 경화특성(K_3)의 정도에 따라서 비교하여 Fig. 8

에 나타내었다. 비선형 경화특성이 없는 경우는 이선형 모델과 동일한 거동을 나타내며 비선형 경화특성(K_3)이 증가할수록 면진장치에 작용하는 전단력은 작아지고 최대변위응답은 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

비선형 경화특성의 영향을 분석하기 위하여 K_3 가 각각 0 kN/m , 30250 kN/m , 60500 kN/m 일 때, Fig. 4에 나타낸 각각의 지진하중에 대한 원전 격납구조물의 높이에 따른 가속도, 전단력과 변위응답의 최대값을 구하고 이를 30개 지진에 대하여 평균값을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. K_3 를 고려하지 않은 경우, 즉 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 반영하지 않은 경우에 비하여 K_3 를 반영한 경우가 격납구조물의 가속도와 전단력은 크게 평가하며 변위응답은 작게 평가하는 경향을 나타낸다. 이는 EQS의 비선형 해석 모델로 이선형 모델을 사용할 경우에는 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 반영하지 못하므로 실제적인 응답에 비하여 면진된 구조물의 가속도와 전

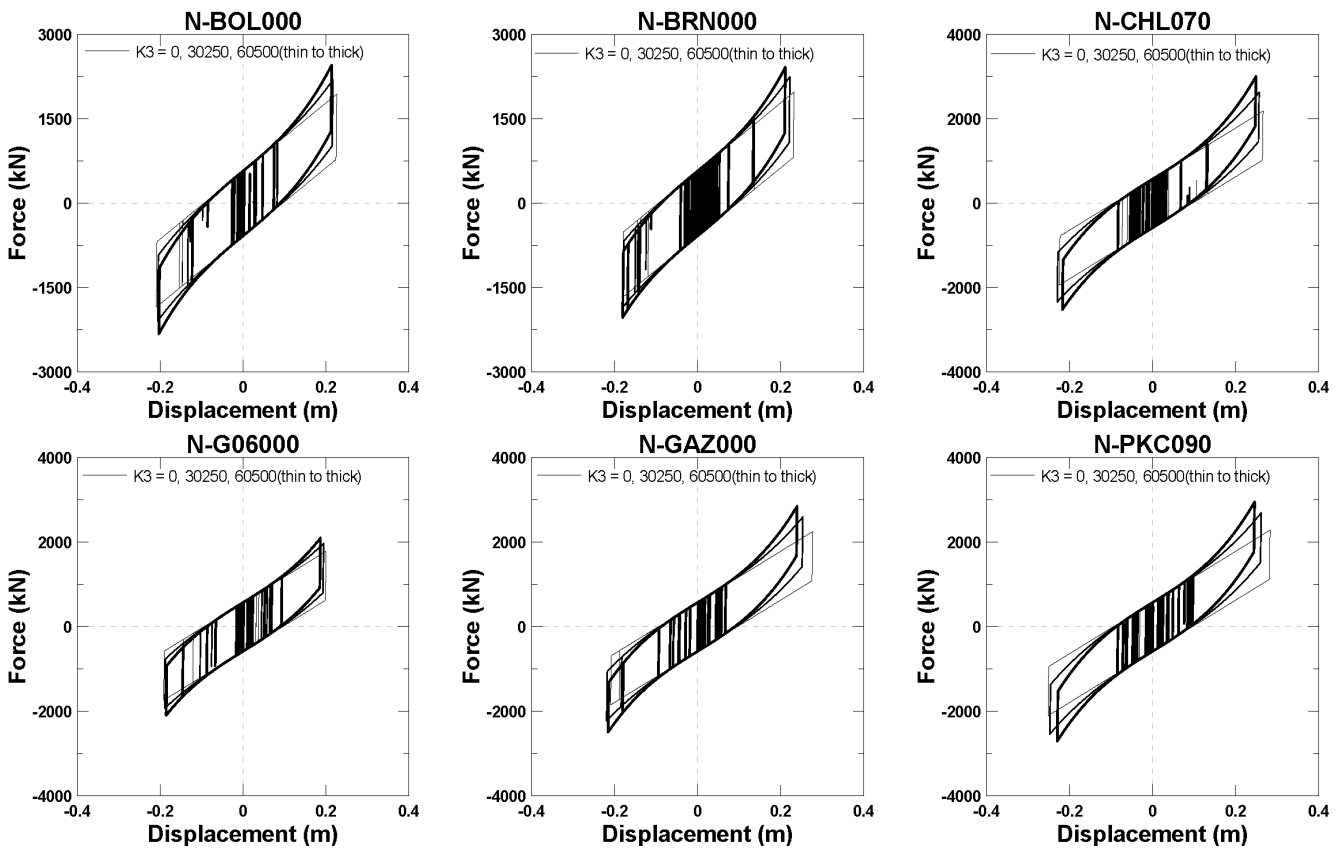


Fig. 8. Comparison of seismic responses of EQS corresponding to post-yield stiffness hardening effect with several K_3

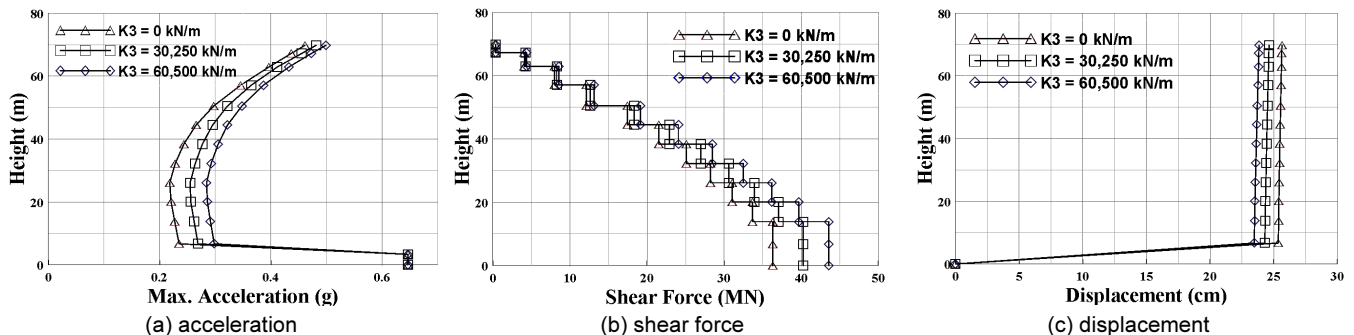


Fig. 9. Comparison of seismic responses of NPP containment structure corresponding to post-yield stiffness hardening effect with several K_3

단력은 각각 23%와 19% 정도 과소평가하고 변위응답은 약 8% 정도 과대 평가함을 의미한다.

4.3 EQS의 비선형 경화 특성의 변화에 따른 설계초과지진에서의 구조물의 응답비교

원전구조물은 Fig. 4에 나타난 설계기준지진(design basis earthquake, DBE)에 대하여 해석하고 설계를 수행하지만 설계초과지진(beyond design basis earthquake, BDBE)에 대하여도 안전성을 평가할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 설계초과지진으로 설계기준지진의 150%와 167% 크기의 지진을 사용하여 면진원전의 동적거동의 영향을 분석하였다. 설계초과지진으로 150% DBE는 NUREG 보고서[11]에 167% DBE는 ASCE/SEI 4-16 보고서[12]에 언급이 되어 있다. 아직 설계초과지진으로 150% DBE가 적절한지 167% DBE가 적절한지 최종적으로 연구결과가 나오지 않았기 때문에 본 논문에서는 두 경우를 모두 사용하여 비교하였다. 비선형 경화 특성의 변화에 따라 설계초과지진에서의 원전 구조물의 거동을 평가하여 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 비선형 경화 특성에 따른 K_3 는 0 kN/m, 30250 kN/m, 60500 kN/m 일 때의 거동을 평가하였다. 설계초과지진의 경우가 K_3 의 증가에 따른 항복 후 강성의 비선형경화 특성이

설계기준지진의 경우보다 뚜렷하게 발생하며, 150% DBE에서 EQS의 변위응답은 약 2배정도 증가하고 최대전단력도 약 2배정도 증가함을 알 수 있다. 167% DBE에서 EQS의 변위응답은 약 2.8배정도 증가하고 최대전단력은 약 3.1배정도 증가함을 알 수 있다. K_3 가 증가함에 따라 변위응답은 감소하고 전단력을 증가하는 특성을 나타낸다.

설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진(150% DBE와 167% DBE) 하중에 대하여 면진장치의 비선형 경화 특성($K_3 = 60500 \text{ kN/m}$)을 고려하여 면진된 격납구조물의 가속도응답, 전단력과 변위응답의 최대값을 각각의 지진하중에 대하여 구하고 이를 평균값으로 구하여 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. 설계기준지진에 대한 원전격납구조물의 하층부에 대한 가속도에 비하여 150% DBE에 대한 하층부 가속도가 약 2.17배 정도, 167% DBE에 대해서는 하층부 가속도가 약 2.7배 정도 증가하였다. 설계기준지진에 대한 원전격납구조물의 밀면전단력에 비하여 150% DBE에 대한 밀면전단력이 약 2.26배 정도, 167% DBE에 대해서는 약 2.9배 정도 증가하였다. 설계기준지진에 대한 면진장치 EQS의 변위응답에 비하여 150% DBE에 대한 변위응답이 약 1.65배 정도, 167% DBE에 대해서는 약 1.87배 정도 증가하였다.

Fig. 12(a)에 나타낸 가속도 응답으로부터 격납구조물의 최상층의 가속도(a_2)와 격납구조물의 최하층의 가속도(a_1)를 면진장치 기초부의 가속

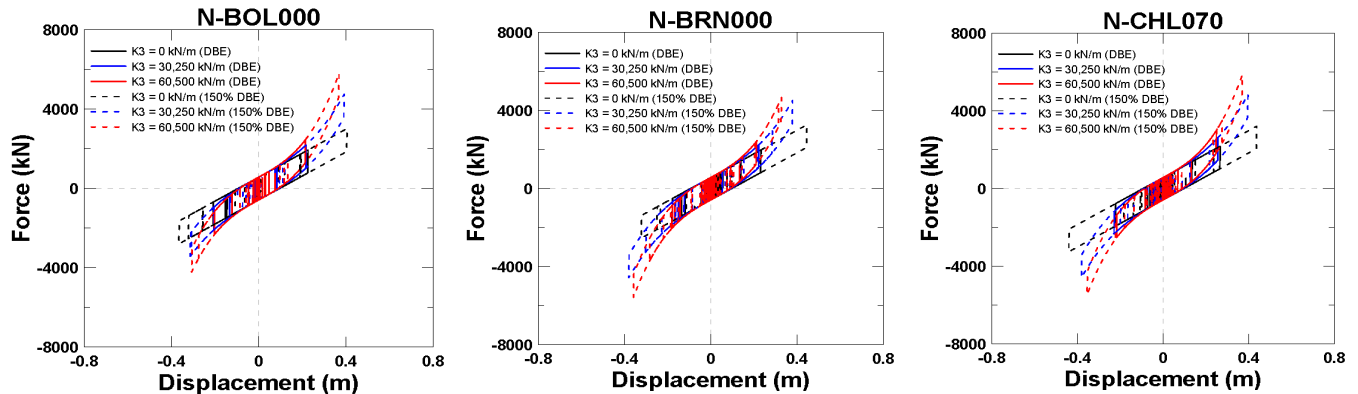


Fig. 10. Comparison of force-displacement relationship of EQS corresponding to post-yield stiffness hardening effect with several K_3 & 150% DBE

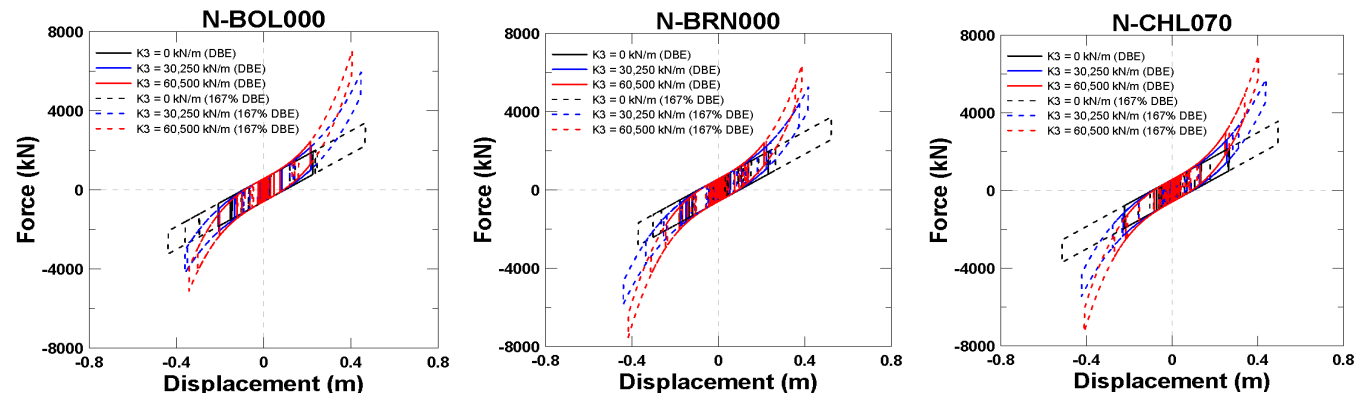


Fig. 11. Comparison of force-displacement relationship of EQS corresponding to post-yield stiffness hardening effect with several K_3 & 167% DBE

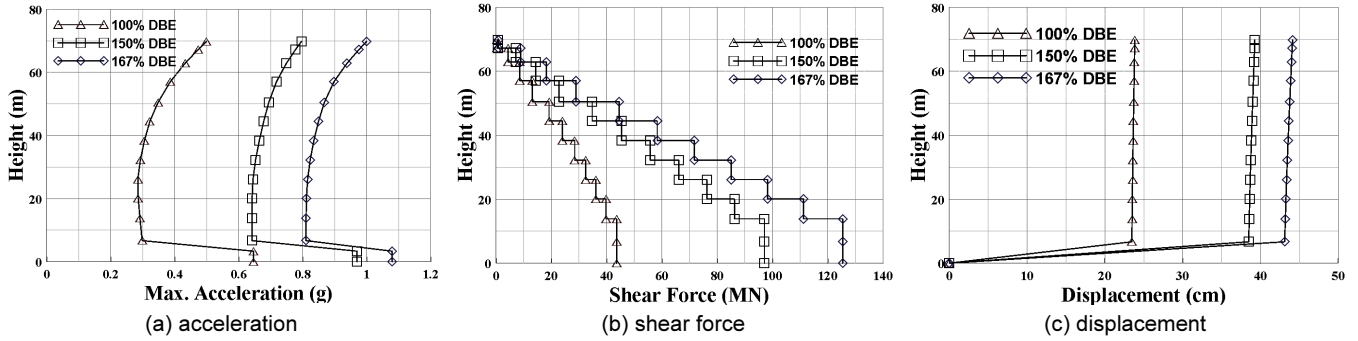


Fig. 12. Comparison of seismic responses of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, and 167% design basis earthquakes

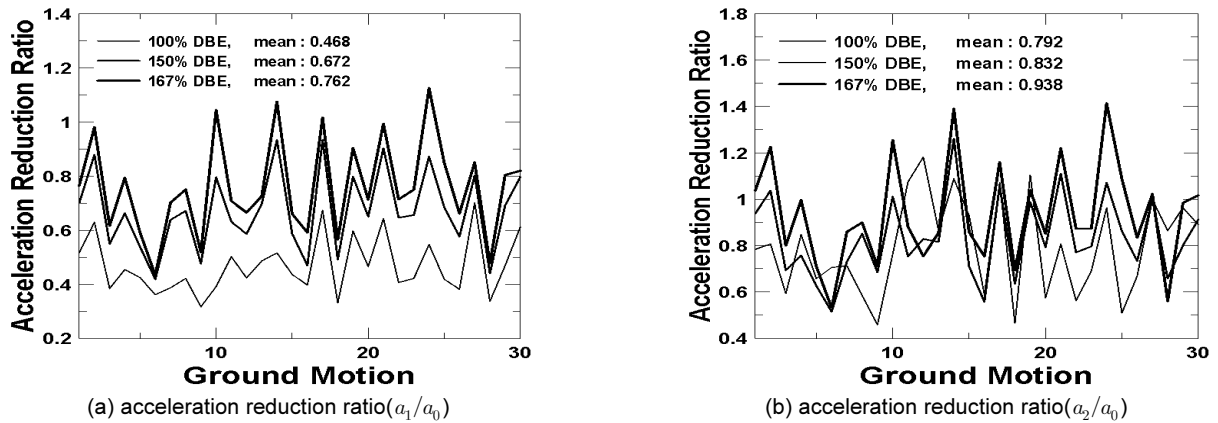


Fig. 13. Comparison of acceleration reduction ratios of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, and 167% design basis earthquakes

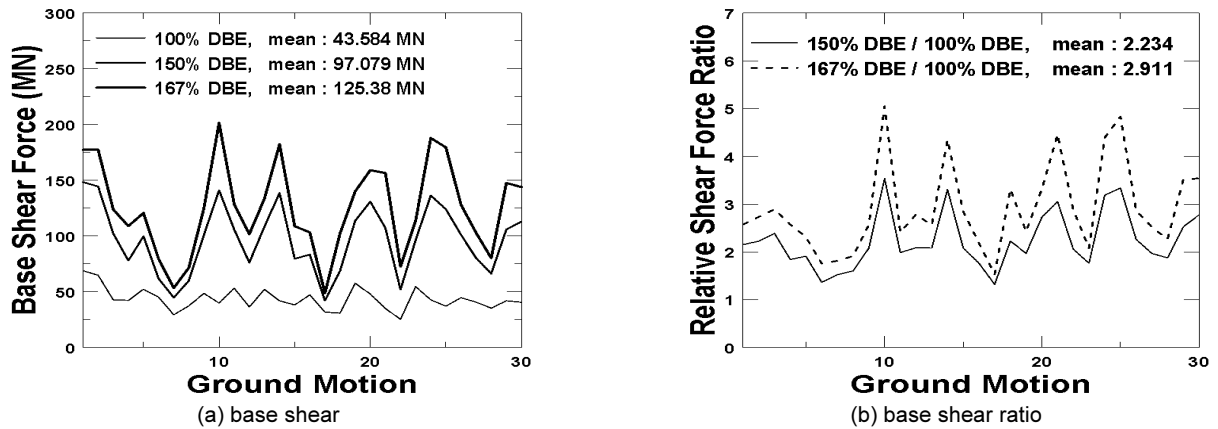


Fig. 14. Comparison of base shear and base shear ratio of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, and 167% design basis earthquakes.

도(a_0)로 나누어 설계초과지진에 따른 가속도 저감율을 30개 입력지진에 대하여 구하여 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13의 가로축에 나타난 1부터 30 까지의 지반운동의 일련번호는 Table 1에 나타난 지진의 일련번호와 동일하다. a_1/a_0 는 면진장치 기초부에 입력되는 가속도가 면진장치에 의해 저감되어 격납구조물 하중부에 전달되는 정도를 나타낸다. 즉, 작은 값일수록

면진장치에 의한 가속도 저감성능이 우수하다고 할 수 있다. a_2/a_0 는 면진장치 기초부에 입력되는 가속도가 면진장치에 의해 저감되어 격납구조물 상층부까지 전달되는 정도를 나타낸다. 100% DBE에 대한 가속도 저감율(a_1/a_0)의 평균은 0.468이고, 150% DBE에 대해서는 0.672이고, 167% DBE에 대해서는 0.762로서 설계초과지진하중의 크기가 커질수록 면진장

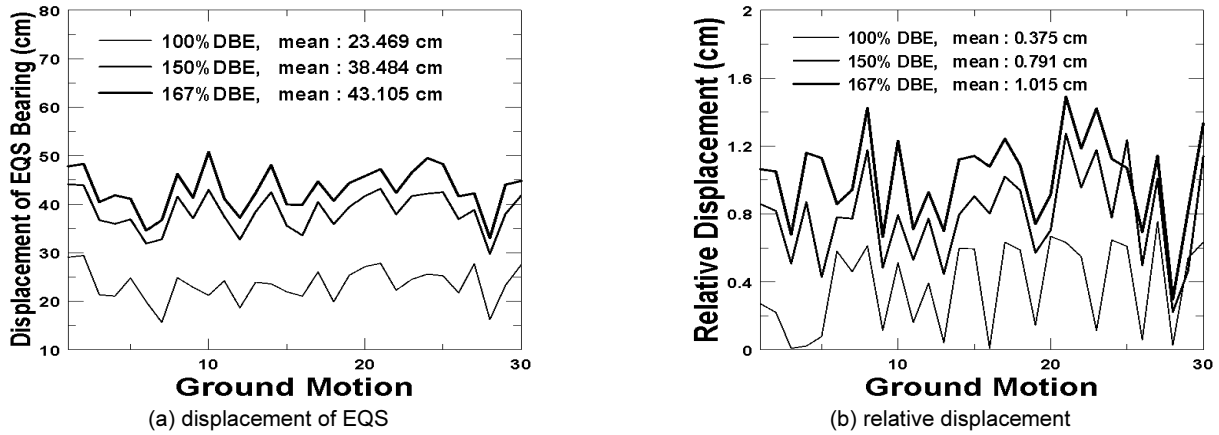


Fig. 15. Comparison of displacement responses of seismically isolated NPP containment structure subjected to 100%, 150%, and 167% design basis earthquakes.

Table 1. Characteristics of seed earthquakes used in artificially generating process

NO.	Year	Magnitude	Component	Earthquake	PGA(g)
1	1982	5.70	IB20A	Miramich, Canada	0.3410
2	1988	5.90	DKKYA	Saguenay, Canada	0.1000
3	1966	6.19	TMB205	Parkfield	0.2934
4	1971	6.61	PUL164	San Fernando	1.1644
5	1976	6.8	GAZ000	Gazli, USSR	0.6438
6	1979	6.53	H-E05140	Imperial Valley-06	0.4481
7	1979	6.53	H-SUP045	Imperial Valley-06	0.1598
8	1980	5.80	A-KOD180	Livermore-01	0.1066
9	1980	6.33	CPE045	Victoria, Mexico	0.5722
10	1984	6.19	CLS220	Morgan Hill	0.0983
11	1984	6.19	G06000	Morgan Hill	0.2814
12	1985	6.76	S1010	Nahanni	1.0556
13	1985	6.76	S3270	Nahanni	0.1512
14	1987	6.54	B-ICC000	Superstition Hills-02	0.2933
15	1988	6.77	GUK000	Spitak, Armenia	0.2071
16	1989	6.93	BRN000	Loma Prieta	0.5263
17	1989	6.93	CLS000	Loma Prieta	0.4975
18	1989	6.93	LGP000	Loma Prieta	0.7835
19	1992	6.69	ERZ-EW	Erzican, Turkey	0.4886
20	1992	7.01	CPM000	Cape Mendocino	1.3455
21	1994	6.69	CHL070	Northridge-01	0.2148
22	1994	6.69	PAC175	Northridge	0.4085
23	1994	6.69	PKC090	Northridge	0.3482
24	1994	6.69	RRS228	Northridge-01	0.6336
25	1995	6.90	KJM000	Kobe	0.7105
26	1999	7.51	GYN000	Kocaeli, Turkey	0.1387
27	1999	7.51	IZT090	Kocaeli, Turkey	0.2037
28	1999	7.62	TCU072-E	Chi-Chi, Taiwan	0.4033
29	1999	7.62	TCU089-E	Chi-Chi, Taiwan	0.2878
30	1999	7.14	BOL000	Duzce, Turkey	0.7662

치에 의한 가속도 저감율이 커지므로 가속도 저감능력이 감소함을 의미한다. a_2/a_0 의 경향도 a_1/a_0 의 경향과 유사하다.

Fig. 12(b)에 나타난 전단력과 관련이 있는 격납구조물의 밀면전단력 (V_b)을 30개 설계초과지진에 대하여 각각 구하여 Fig. 14(a)에 나타내었다. 설계초과지진에 대한 밀면전단력(V_b)을 설계기준지진의 밀면전단력으로 나눈 밀면전단력비를 Fig. 14(b)에 나타내었다. 밀면전단력비는 지진하중의 증가에 따른 격납구조물의 밀면전단력의 증가정도를 나타내며 150% DBE에서는 2.234배 증가하며 167% DBE에서는 2.911배 증가함을 알 수 있는데 지진하중의 증가비율보다 밀면전단력의 증가비율이 큼을 알 수 있다. 이는 설계초과지진에 대한 격납구조물의 설계강도를 설계초과지진의 설계기준지진의 증가정도(1.5배 또는 1.67배)보다 훨씬 크게 반영(설계기준지진에 대한 설계초과지진의 설계강도의 증가비율은 2.234배 또는 2.911배)하여 설계하여야 함을 의미한다.

Fig. 12(c)에 나타난 변위응답과 관련하여 면진장치의 변위(D_b)를 개별 설계기준지진과 설계초과지진에 대하여 Fig. 15(a)에 나타내었으며 격납구조물의 최상층의 변위(D_t)와 최하층부의 변위(D_b)의 차이인 격납구조물의 상대변위를 Fig. 15(b)에 나타내었다. Fig. 15의 (a)에서 면진장치(EQS Bearing)의 변위(D_b)는 설계기준지진(100% DBE)에 비해 150% DBE의 경우 약 64%, 167% DBE의 경우 약 83.7% 증가하는 것을 확인할 수 있었고, Fig. 15의 (b)에 나타난 격납구조물의 상대변위는 설계기준지진에 비하여 150% DBE의 경우 약 111%, 167% DBE의 경우 170.5% 정도로 증가한다. 격납구조물의 상대변위(0.375~1.015 cm)는 면진장치의 변위(23.468~43.105 cm)에 비하면 아주 작은 값을 유지하며 이는 대부분의 지진하중에 의한 비탄성변위는 면진장치에서 발생하므로 격납구조물의 상대변위는 탄성범위 내에 발생하여 격납구조물의 안전성이 확보되고 있음을 의미한다.

4.4 EQS의 항복 후 강성에 대한 비선형 경화성분의 지수(η)에 따른 응답 비교

식 (6)은 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침(EQS)의 비선형 경화

특성에 관한 강성을 나타낸다. 비선형 경화 특성의 발현 시점은 식 (6)의 η 값에 의해 영향을 받는다. η 의 변화에 따른 비선형 경화특성의 발생하기 시작하는 변위 시작점을 Fig. 16에 나타내었다. 비선형 경화특성이 발현되는 변위시작점은 η 값이 증가할수록 지수 함수적으로 증가하는 특성을 나타낸다. 즉, η 값이 증가할수록 항복 후 강성의 비선형 경화특성이 나타나는 변위시작점이 증가하는 것을 의미하므로, 비선형 경화특성의 발생정도가 동일한 변위응답에서는 작게 나타남을 의미한다.

η 값에 증가함에 따른 EQS의 지진에 대한 힘-변위관계를 Fig. 17에 나타내었다. η 값에 증가함에 비선형 경화가 보다 큰 변위에서 발생하기 시작

하여 항복 후 강성의 비선형 경화특성이 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig 17에 나타낸 바와 같이 η 값이 증가함에 따라서 비선형 경화특성의 감소로 EQS에 작용하는 최대전단력도 감소함을 알 수 있다. η 값이 2에서 10까지 변화함에 따른 최대전단력의 변화를 Fig. 18에 나타내었다. η 값이 5부터 10까지는 값의 차이가 거의 없이 일정하게 수렴함을 알 수 있다. η 값이 5 이상이면 EQS의 힘-변위응답이 이선형 모델의 응답과 거의 동일하게 나타나므로 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 반영하지 않아도 됨을 의미한다.

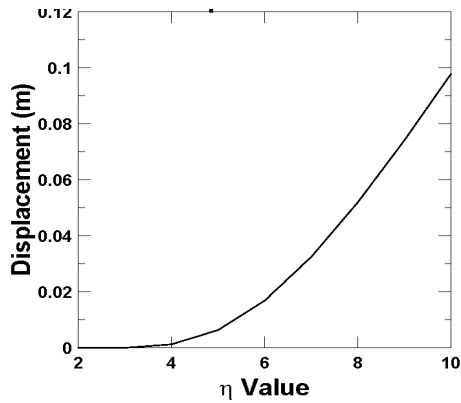


Fig. 16. Threshold displacement for post yield stiffness hardening effect corresponding to η

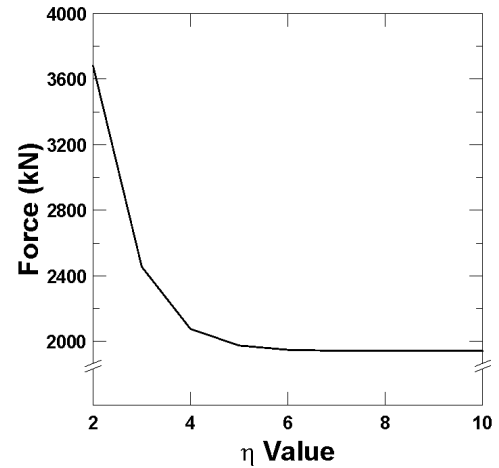


Fig. 18. Comparison of Maximum force of EQS corresponding to η

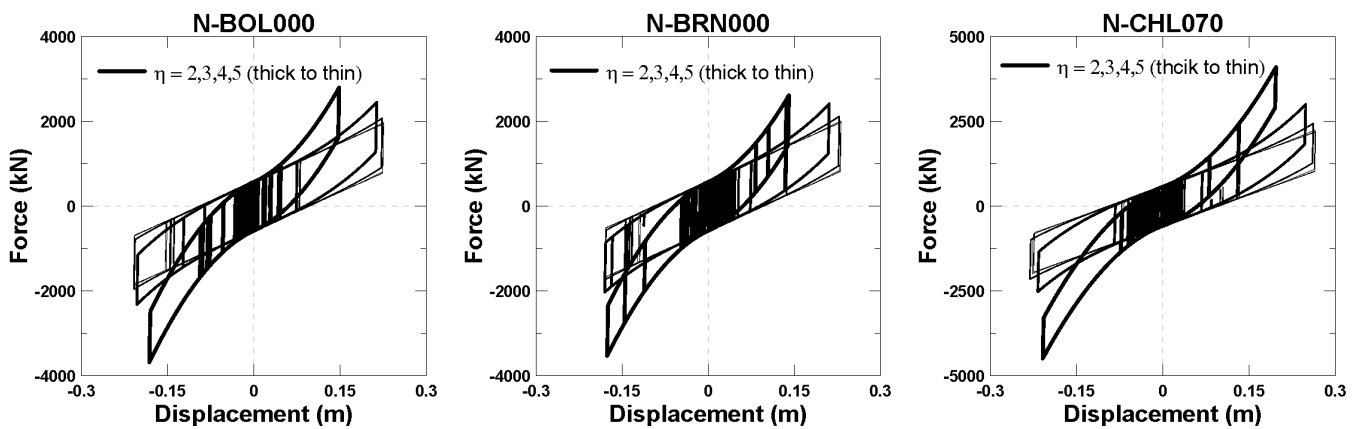


Fig. 17. Comparison of seismic responses of EQS corresponding to η effect

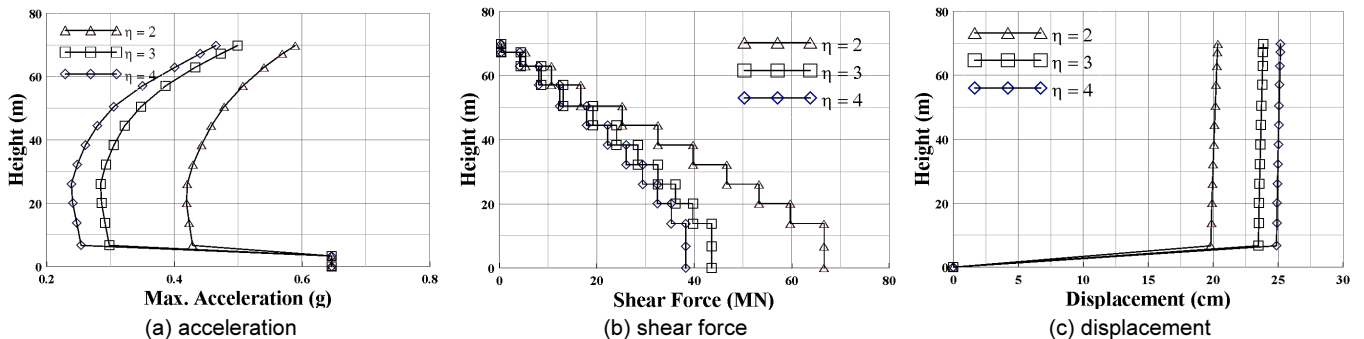


Fig. 19. Comparison of seismic responses of NPP containment structure corresponding to η effect of EQS

설계기준지진(100% DBE)에 대하여 면진장치의 비선형 경화특성($\eta=2, 3, 4$)에 따른 면진된 격납구조물의 가속도응답, 전단력과 변위응답의 최대값을 각각의 지진하중에 대하여 구하고 이를 평균값으로 구하여 Fig. 19에 비교하여 나타내었다. η 의 증가에 따른 응답의 변화는 η 이 5이상의 경우에는 수렴하는 경향을 나타냄으로 η 에 따른 응답의 차이가 의미 있는 수준을 나타내는 2, 3, 4의 경우에 대하여 나타내었다. η 이 증가할수록 격납 구조물에 작용하는 가속도 응답과 전단력은 감소하며, 면진장치의 변위응답은 증가하는 경향을 나타내며 이러한 증가율은 η 이 증가할수록 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 결론적으로 EQS의 항복 후 강성의 경화특성에 따라 면진된 격납구조물의 응답이 민감하게 영향을 받을 수 있음을 의미하며 EQS의 설계 시에 필수적으로 항복 후 경화특성을 반영하여야 함을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침(EQS)에 의해 면진된 원전구조물의 항복 후 강성의 비선형 경화특성의 반영 정도에 따른 지진응답을 설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진인 150% DBE와 167% DBE에 대하여 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 설계기준지진(100% DBE)에 대한 EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화특성의 변화에 따른 구조물의 거동은 비선형 경화특성이 증가할수록 면진장치의 전단력이 증가하고, 변위응답이 감소하는 경향을 나타낸다. EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 반영하지 않은 경우에 비하여 반영한 경우가 격납구조물의 가속도와 전단력은 크게 평가하며 변위응답은 작게 평가하는 경향을 나타낸다. 이는 EQS의 비선형 해석모델로 이선형 모델을 사용할 경우에는 항복 후 강성의 비선형 경화특성을 반영하지 못하므로 실제적인 응답에 비하여 면진된 구조물의 가속도와 전단력은 과소평가하고 변위응답은 과대평가함을 의미한다.
- 2) 설계기준지진(100% DBE)에 대한 EQS의 변위응답에 비하여 150% DBE에 대한 변위응답이 약 1.65배 정도, 167% DBE에 대해서는 약 1.87배 정도 증가하는 경향을 나타낸다. 설계기준지진에 대한 원전격납구조물의 하층부에 대한 가속도에 비하여 150% DBE에 대한 가속도가 약 2.17배 정도, 167% DBE에 대해서는 약 2.7배 정도 증가하였다. 설계기준지진에 대한 원전격납구조물의 밀면전단력에 비하여 150% DBE에 대한 밀면전단력이 약 2.26배 정도, 167% DBE에 대해서는 약 2.9배 정도 증가하였다.
- 3) EQS의 비선형 경화특성이 발현되는 변위시작점은 비선형 경화성분의 지수 η 값이 증가할수록 지수함수적으로 증가하는 특성을 나타낸다. η 값에 증가함에 따라 비선형 경화가 보다 큰 변위에서 발생하기 시작하여 항복 후 강성의 비선형 경화특성이 급격히 감소함을 알 수 있다. η 값이 증가함에 따라서 비선형 경화특성의 감소로 EQS에 작용하는 최대 전단력도 감소함을 알 수 있다. η 값이 5부터 10까지는 최대전단력의 변화 정도가 거의 없이 일정하게 수렴함을 알 수 있다. 이 구간은 이선형 모델의 응답과 거의 동일하게 나타남을 의미한다.
- 4) EQS의 항복 후 강성의 비선형 경화성분의 지수인 η 이 증가할수록 격납

구조물에 작용하는 가속도응답과 전단력은 감소하며, 면진장치의 변위응답은 증가하는 경향을 나타내며 이러한 증가율은 η 이 증가할수록 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 결론적으로 EQS의 항복 후 강성의 경화특성에 따라 면진된 격납구조물의 응답이 민감하게 영향을 받을 수 있음을 의미하며 EQS의 설계 시에 필수적으로 항복 후 경화특성을 반영하여야 함을 의미한다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원전융합 원천기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제의 지원되었기에 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Park HG, Lee YI, Jung DY, Experimental and Analytical Study of the Dynamic Behavior of a Polyurethane Spring Restoring Disk Bearing, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2011;15(2): 61-69.
2. Yu SM, Lee YI, Ji YS, Choi DS, Kim DK, A Study on the Application of EQS bearings for the Seismic Isolation of Building Structures by ICT Case study, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(2): 61-70.
3. Federal Emergency Management Agency, NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA 274) Ch. 9. Seismic Isolation and Energy Dissipation, c1997.
4. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC, A system for analysis of soil-structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley, c1999.
5. 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.
6. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R, An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, Journal of Earthquake Engineering, 2006;10(SI): 67-89.
7. U.S. Atomic Energy Commission, Regulatory Guide 1.60, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, c1973.
8. Seok CG, Seismic Response Evaluation of NPP Containment Structures According to Model Characteristics of The Isolation System, Master's thesis Kangwon University, c2015.
9. Lee YI, Lee YJ, Lee HP, Cho MS, Jee YS, Beak JH, Study on the Performance Improvement of an EQS Device Applied Nuclear Power Plant, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2015;19(1): 13-19.
10. Jung DY, Dynamic and Long-term Behavior Characteristics of Sliding Isolation Disk Bearing with Polyurethane and PTFE, Doctor's thesis Incheon University, c2011.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft), c2012.

12. ASCE, forthcoming. ASCE/SEI 4-16, Seismic analysis of safety-related nuclear structures. Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
13. Oh J, Park KN, Lim TG, Jung HY. An Experimental Study on the Characteristics of Bridge Bearing Using Polyurethane. Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2008;03:134-141.
14. Kang TW, Ji YS, Bang IS. The Method of Optimal Stiffness Design for Eradi-Quake System(EQS). Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2009: 286-289.
15. Shim HH, Kwon OK. Friction and Wear Characteristics of PTFE-Polyimide Composite. Journal of Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 1995;11(4): 28-34.
16. Oh J, Park KN, Kim HO, Yang YS. Compressive Horizontal Load Dependent Characterization Test of Isolation Disk Bearing. Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2009: 2299-2302.