

원전 적용을 위한 면진장치의 성능기반 설계 변위 추정

Estimation of the Isolator Displacement for the Performance Based Design of Nuclear Power Plants

김정한^{1)*} · 최인길¹⁾ · 김민규¹⁾

Kim, Jung Han^{1)*} · Choi, In-Kil¹⁾ · Kim, Min Kyu¹⁾

¹⁾한국원자력연구원

¹⁾Korea Atomic Energy Research Institute

/ A B S T R A C T /

There has been an increasing demand for introducing a base isolation system to secure the seismic safety of a nuclear power plant. However, the design criteria and the safety assessment methodology of a base isolated nuclear facility are still being developed. A performance based design concept for the base isolation system needs to be added to the general seismic design procedures. For the base isolation system, the displacement responses of isolators excited by the extended design basis earthquake are important as well as the design displacement. The possible displacement response by the extended design basis earthquake should be limited less than the failure displacement of the isolator. The failure of isolators were investigated by an experimental test to define the ultimate strain level of rubber bearings. The uncertainty analysis, considering the variations of the mechanical properties of isolators and input ground motions, was performed to estimate the probabilistic distribution of the isolator displacement. The relationship of the displacement response by each ground motion level was compared in view of a period elongation and a reduction of damping. Finally, several examples of isolator parameters are calculated and the considerations for an acceptable isolation design is discussed.

Key words: Base isolation, Performance based seismic design, Extended design basis earthquake, Lead rubber bearing

1. 서 론

후쿠시마 사고 이후 세계적으로 지진, 쓰나미 등의 자연재해에 의한 원자력발전소(원전)의 안전성을 확보하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 지진의 경우 원전이 건설될 부지에 대한 지진재해도 평가를 통해 설계 지진을 설정하고 이에 대비한 내진설계를 수행해왔다. 원전은 일반산업시설이나 건축물에 비해 매우 엄격한 기준을 가지고 높은 설계지진에 대해 설계하고 건설되고 있다. 원전의 설계에 필요한 설계지진 수준은 원전이 건설될 부지에서 과거에 발생한 최대의 지진을 고려하여 결정론적 또는 확률론적 지진재해도 평가를 통해 산정하게 된다. 이렇게 산정된 설계지진에 대하여 내진설계를 함으로써 원전의 지진안전성을 확보한다. 그러나 2007년 일본에서 발생한 니가타지진 및 2011년 발생한 동일본 대지진에서 보듯이 설계단계에서 설정한 설계지진을 초과하는 지진의 발생은 언제든지 가능하다. 이들 지진으로 인해 원전에서 진동으로 인한 큰 손상이 발생하지 않았다

고는 하나 원전의 지진안전성에 대한 우려가 일반인 뿐 만 아니라 전문가들 사이에서도 큰 이슈로 대두되고 있는 실정이다.

기존의 발전소 내부 설계를 유지하면서 원전에 대한 지진안전성을 확보하는 방안으로 면진시스템(지진격리시스템) 도입이 하나의 대안이다. 그러나 면진은 일반시설물에서는 오래전부터 적용되어 왔으나 아직 원전에서는 보편적인 설계기준 조차 마련되어 있지 않다. 특히 원전 내의 기기들은 고유의 안전계통 기능을 유지하기 위해 여분의 동일한 설비를 보유하고 있으나 면진시스템 같은 경우 이러한 여분이나 완화계통을 확보하기 곤란하므로 어떠한 경우에도 면진장치가 손상되는 것을 방지하여야 한다. 따라서 원전에 면진장치를 적용하기 위해서는 무엇보다 면진장치 자체의 지진안전성 확보가 가장 중요하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 현재 개발 진행 중인 면진원전 설계기준에 대비하여 설계 지진 이상의 지진에 대해 면진장치의 지진안전성을 확보하기 위한 면진장치의 한계상태 평가 방법을 제안한다. 먼저 각종 국내의 기준에서 제시하고 있는 면진장치 설계에서의 한계상태를 분석하고 면진장치의 응답해석을 통해 면진장치의 한계변위를 산정하였다. 이러한 방법을 기준으로 구체적인 면진장치 설계 예를 통하여 면진장치가 확보해야 할 요구 성능을 제안하고자 한다.

*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@kaeri.re.kr

(Received 5 June 2014; Revised 6 October 2014; Accepted 6 October 2014)

2. 원전 면진의 설계 기준

2.1 일반적인 면진 설계

면진장치를 설계하기 위한 설계지진 및 이에 따른 설계변위의 산정방식에 대해 여러 가지 기준이 국내외에 제시되어 있다. 면진의 개념은 상대적으로 강성이 작은 면진장치에 의해 구조시스템의 고유주기를 장주기로 이동시켜 응답변위를 늘리는 대신 바닥전단력을 감소시키는 것이다. 상부구조가 면진장치에 비해 상대적으로 강성이 커서 단자유도로 거동한다는 가정을 하면 면진장치의 설계변위(D)는 식 (1)과 같이 설계스펙트럼 상에서 주기 이동에 따른 변위의 증가와 감쇠에 의한 변위의 감소로 표현이 된다.

$$D = \frac{S_a \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2}{B_D} \quad (1)$$

여기서 T 는 면진시스템의 고유주기이고 S_a 는 이 주기에 해당하는 스펙트럴 가속도이며 B_D 는 면진장치의 감쇠에 의한 감쇠수정계수이다. 이 방법은 면진 주기가 응답변위에 따라서 달라지지 않는다는 가정이 전제되어야 한다. 이중선형 이력거동을 보이는 면진시스템의 경우에는 응답변위에 따라 유효주기가 달라지므로 설계변위 결정시 반복계산을 거쳐서 보다 정확한 응답변위를 추정할 수 있다.

수식의 표현은 다소 다르지만 ASCE 7-10[1]과 같은 대부분의 설계기준에서는 이와 같은 단순한 설계식을 기본으로 하며, 여기에 편심에 의한 영향이나 시간이력 해석에 의한 수평방향 하중 조합 등에 대한 세부기준이 추가되는 형식이다. 그러나 이들 대부분의 기준에서는 설계단계에서의 면진장치 설계변위만을 제시하고 있으며 설계지진 이상의 지진에 대한 면진장치의 안전성 확보 방안에 대해서는 그 기준을 제시하지 않고 있다.

2.2 원전의 면진설계

미국의 경우 원전은 ASCE 43-05[2]를 근간으로 하는 성능기반 설계법을 적용하고 있다. 여기서는 설계지진 및 설계초과지진에 대한 성능기준을 지진재해도 수준 및 성능목표로 표현하고 있으며 원전의 경우 노심손상빈도(Core Damage Frequency)나 초기대량방출빈도(Large Early Release Frequency)가 $1 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 이하가 되도록 규정하고 있다. 그러나 이러한 성능목표는 원전의 확률론적 리스크 평가를 수행하여야만 확인할 수 있는 사항으로 초기 설계단계에서는 확인하기 곤란하다. 그 대안으로 ASCE 43-05에서는 Table 1과 같이 DBE (Design Basis Earthquake)와 150% DBE 지진동 수준에 따른 비허용성능의 신뢰도 값으로 이러한 성능목표를

충족시킬 수 있는 방법을 제시하고 있다.

미국 원자력 규제기관인 NRC에서는 면진장치를 원전에 적용하기 위한 기술적 가이드라인[3]을 작성 중에 있으며 마찬가지로 설계지진 (Ground Motion Response Spectrum, GMRS) 및 설계초과지진 (Extended Design Basis Ground Motion Response Spectrum, EDB)에 대한 면진장치의 안전성을 요구하고 있다. 여기서 GMRS의 지진동 수준은 ASCE의 성능기반 설계에 따라 제시된 RG 1.208[4]의 기준에 의한 부지고유의 지반응답스펙트럼을 말하며, GMRS의 재해도 수준은 10,000년 빈도의 지진으로 하고 EDB는 100,000년 빈도의 지진 또는 GMRS의 167%를 포괄하는 지진으로 정의한다. 이들 각각의 지진동 수준에 따른 면진장치 및 시스템의 성능목표를 Table 1에 같이 요약하였다.

일본의 대표적인 면진원전 설계기준은 JEAG-4614[5]이다. 여기서는 면진장치의 설계한계를 탄성한계 변위에 일정수준의 안전계수를 고려하여 제한하고 있다. 구체적으로는 고무소재 면진장치의 탄성한계변위는 250% 내외의 전단변형률을 기준으로 하고 있으며 허용한계변위는 1.5의 안전계수를 고려하여 167% 내외의 전단변형률을 허용하고 있다. 여기에 설계지진으로 인한 변위에 여유를 두어 실제 반영되는 설계변위의 한계는 약 130% 전단변형률 정도가 된다. 그러나 일본의 기준은 기본적으로 설계지진에 대한 규정만을 제시하고 있으며, 설계 시 고려된 안전율에 의해서 설계초과지진의 안전성이 확보된 것으로 가정하고 있다.

유럽에서는 일반시설물에 대한 기준에서[6] 면진장치의 손상을 방지하기 위한 한계상태에서의 변형률 기준을 250% 이하로 규정하고 있다. 이탈리아에 면진원전을 도입하기 위한 ENEA의 연구[7]에서는 원전의 경우 시설의 중요성이나 손상에 따른 파급효과 등을 고려할 때 설계지진 상태에서 한계변형률을 100% 이하로 제한하여야 한다고 제안하고 있다.

3. 면진장치의 특성변수 설계 및 한계변위

일반적으로 면진장치를 등가선형거동으로 이상화하여 모델링 하게 되면, 구조시스템을 장주기화 하기 위한 유효강성과 응답변위를 감소시키기 위한 등가감쇠가 설계 변수가 된다. 면진장치는 다양한 종류가 있지만 원전의 경우에는 설계초과지진에 의한 상당량의 변위 흡수가 가능해야 하므로 연신률이 좋은 고무계열 면진장치가 적합하다. 고무계열 면진장치 중에서도 고감쇠 고무보다 천연 고무가 거동의 예측이 명확하기 때문에 선호되고 있으며, 천연고무의 부족한 감쇠능력을 확보하기 위해 가운데에 납이 삽입된 납삽입적층고무받침(Lead Rubber Bearing, LRB)이 최근에 원전에 가장 적합한 면진장치로 거론되고 있다. LRB는 초기강성(K_1), 2차강성(K_2) 및 특성강도(Q_0)를 설계변수로 하는 이중선형 거동으로 모델링 될 수 있다. 이 연구에서는 LRB를 대상으로 하여 원전에 적용 가능한 설계 특성변수 값을 예로 들어 성능기반 설계에 대해 서술하였다.

Table 1. Performance criteria for nuclear power plants

	Ground Motion Level	Performance Criteria
Performance Criteria of ASCE	DBE	Less than a 1% probability of unacceptable performance
	1.5 X DBE	Less than a 10% probability of unacceptable performance
Performance Criteria of NUREG (Draft)	GMRS (1×10^{-4})	100% confidence of the isolation system surviving without damage
	EDB (1×10^{-5})	90% confidence of the isolation system surviving without loss of gravity-load capacity

3.1 LRB의 상세 설계

LRB는 고무를 여러 겹으로 적층시켜 수평방향으로는 고무의 전단변형에 의해 낮은 강성을 가지면서도 수직방향으로는 충분한 지지력을 가지도록 하는 구조이다. 면진시스템을 장주기화시켜주는 항복 후 수평강성은 고무의 전단탄성계수(G_s)가 가장 중요한 설계 변수이다. 일부 LRB 설계 방법에서는 항복 후 수평강성을 산정할 때 납플러그에 의한 기여도가 반영되기도 하지만 그 영향은 크지 않아서, 이 연구에서는 항복 후 수평강성(K_2)을 식 (2)와 같이 고무의 전단거동에 의한 것으로만 적용하였다.

$$K_2 = \frac{A_R \cdot G_s}{h_R} \quad (2)$$

여기서 A_R 은 고무의 단면적이며, h_R 은 고무층 전체의 높이이다.

납플러그는 LRB의 반복재하에 의한 이력거동 시 항복에 의해 에너지를 소산시키는 역할을 하며, 따라서 항복강도가 주요 변수이다. 이 연구에서 납플러그의 전단강도(τ_p)는 8.33 MPa를 적용하였으며 여기에 납의 단면적(A_p)을 곱하여 식 (3)과 같이 면진장치의 특성강도가 얻어진다.

$$Q_d = A_p \cdot \tau_p \quad (3)$$

LRB의 초기수평강성(K_1)은 납플러그가 항복하기 이전의 거동에 의한 것이며, 이 값이 변화하더라도 등가강성에 미치는 영향은 없고 이력면적에만 약간의 차이가 생겨 감쇠에만 다소 영향을 미치기 때문에 면진시스템의 응답변위에는 큰 영향이 없다. 초기수평강성은 항복 후 수평강성에 대한 상대적인 비율로 주어지며 JEAG-4614[5]에서는 그 비(K_1/K_2)가 경험적으로 약 10~20 사이라고 제시한다. 여기서는 그 중간값인 15를 적용하였다.

이 계산식을 토대로 변위응답평가를 위한 예제 면진장치를 설계하였다. 이 연구에서는 APR 1400 원전모델에 면진장치를 도입하는 것으로 가정하였으며, 비면진 원전이 PGA 0.3 g에 대해 설계가 되어있기 때문에 면진에 대해서는 PGA 0.5 g를 설계지진 수준(GMRS)으로 가정하고 스펙트럼 형상은 RG 1.60[8]의 표준응답스펙트럼을 사용하였다. 면진원전의 상부구조 질량은 격납건물, 보조건물 및 기초판(basemat)을 합쳐서 약 465,400 ton이고 면진장치의 개수는 600개로 가정하였다. 설계된 면진장치는 Fig. 1과 같이 외경 1,500 mm, 내경 320 mm, 총 고무높이는 250 mm로 하였으며 고무의 경도, 즉 전단탄성계수는 0.5 MPa로 하였다. 이에 따른 면진장치의 특성변수들과 100% 전단변형, 즉 250 mm 변위 시의 유효강성과 유효 진동수가 Table 2에 정리되었다.

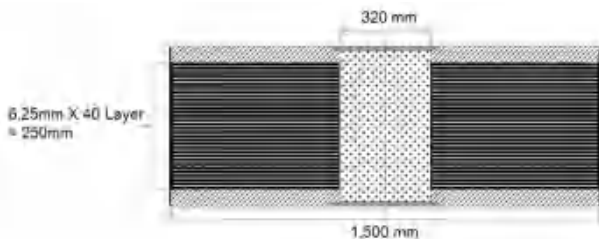


Fig. 1. Cross section of LRB

Table 2. Mechanical property of isolator

K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	Q_d (kN)	Eff. Stiff. (kN/mm)	Mass/1ea (ton)	Eff. Freq. (Hz)
50.6	3.37	670	6.05	776	0.445

3.2 고무계열 면진장치의 한계변형률

적층고무 면진장치에서 정착부와 심플레이트(shim plate) 등 면진장치의 구성 요소가 적절하게 설계되어 있다면, 면진장치의 파괴 모드는 수평변위에 의한 고무의 파단, 수직 압축하중에 의한 좌굴, 수직 인장하중에 의한 고무의 파단 등 3가지로 구분된다. 원전의 경우 격납건물과 보조건물 사이에 중요 배관들이 연결되어 있어 이 두 구조물을 동일한 기초판 위에 건설하는 것이 면진시스템을 구축하기에 유리하다. 이 기초판의 가로 및 세로 치수는 약 100m에 달하지만 원전구조물의 높이는 수 십 m 밖에 안 되기 때문에 수평 지진동에 의해 발생하는 전도모멘트가 외곽부 면진장치들의 수직하중 증감에 미치는 영향은 일반 건축구조물에 비해 미미하다. 따라서 원전의 면진장치에서 발생 가능한 파괴 모드는 과도한 수평변위에 의한 파단이 주요 원인이 될 것으로 판단된다.

일반적으로 면진장치 제작 시 설계변위까지의 거동은 제품 생산 과정에서 테스트하기 때문에 그 거동 특성이 잘 규명 되어 있고 설계 식에 의한 특성 값과도 잘 일치한다. 그러나 설계 초과 변위 발생 시의 한계성능은 예측하기 쉽지 않다. 이에 고무계 면진받침에 대한 한계성능을 파악하기 위한 여러 실험적 연구가 수행되었다. Mizukoshi et al.[9]은 축소규모 적층고무 면진장치에 대하여 다양한 연직하중이 작용한 상태에서 전단변위를 가하여 파괴 시점을 찾았으며, 수직방향으로 과도한 압축 혹은 인장하중이 걸리지 않는 경우는 500% 전단변형률을 조금 넘는 수준에서 파괴가 일어남을 확인하였다. Yabana et al.[10]은 1/3 축소모델 LRB에 대한 진동대 실험에서 설계지진의 약 4배 세기의 지진 시 전단변형률 550%~600% 정도에서 파괴가 일어남을 확인하였다. Feng et al.[11]은 LRB의 전단실험을 수행하여 전단변형률 435%에서 파괴가 일어나고, 60년 경년열화 발생 시에는 380%에서 파괴가 일어남을 보였다. Takaoka et al.[12]은 다양한 연직하중에 대한 축소규모 면진시스템의 진동대 실험을 하였으며 연직하중이 0에 가까운 경우에는 약 500% 변형률에서 파괴가 일어났지만 설계면압에 가까운 연직하중이 작용 시에는 400%를 조금 넘는 변형률에서 파괴가 일어남을 보였다. Kikuch et al.[13] 또한 다양한 연직하중 상태에서 실험을 하였으며, 수직하중이 설계면압에 근접하면 약 400% 변형률에서 전단강성의 기울기가 음으로 떨어지는 현상이 보이지만 면압이 작을 때는 500% 변형률에서도 파괴가 일어나지 않음을 보였다. Minowa et al.[14]은 축소규모 진동대 실험을 통해 고무 면진장치의 형상비에 따른 파괴 실험을 하였고 상대적으로 높은 면진장치는 351% 변형률에서 파괴가 일어났으나 납작한 면진장치는 432%에서 파괴가 일어났음을 보였다. Aiken et al.[15]은 복합고무소재 면진장치는 739% 변형률에서 파괴가 일어나고 천연고무소재 면진장치는 510% 변형률에서 파괴가 일어남을 보였다.

이와 같이 여러 고무계열 면진장치의 파괴 실험 결과들을 볼 때 대부분 400% 전단변형률을 넘어서며 500% 내외에서 전단파괴가 일어남을 알 수 있다. 예외적인 경우가 몇몇 있는데, 연직하중이 설계면압에 준하는 하중이 가해졌을 때나 인장이 가해졌을 때, 고무 직경 대비 높이가 높은 경우, 그

리고 열화가 발생한 경우이다. 원전에 적용되는 면진장치는 실제로 받는 면압이 설계면압의 약 1/3 수준이며, 일반 건축구조에 쓰이는 것 보다 더 납작한 형태를 가지고 있고 또한 지름이 커서 열화현상 또한 적게 발생할 것이기 때문에 이와 같은 예외적인 현상은 발생하지 않을 것으로 추측된다. 이들 결과를 종합하면 다소 보수적인 판단을 하여도 약 400% 변형률을 면진장치의 한계변형률로 정의할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 면진시스템의 응답 변위 추정

4.1 면진시스템의 응답변위 산정 방법

원전구조의 경우 격납건물은 약 4 Hz, 보조건물은 약 8 Hz의 고유진동수를 가지고 있기 때문에 면진층 위의 상부구조는 거의 강체라고 가정할 수 있으며, 이 경우 상부구조 전체를 집중질량으로 하고 각각의 면진장치 수평강성의 총합을 하나의 강성값으로 하는 단자유도 시스템으로 모델링 할 수 있다. 단자유도 시스템인 경우 변위응답은 설계응답스펙트럼으로부터 고유진동수에 해당하는 스펙트럴 가속도로부터 응답변위를 산정하고 여기에 감쇠에 의한 응답감소계수로 나누어 산정할 수 있다. LRB에 의한 면진시스템은 이중선형으로 모델링되기 때문에 감쇠비는 이력거동으로부터 등가점성감쇠로 가정하여 얻어질 수 있으며 이는 식 (4)와 같다.

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (4)$$

여기서 β_0 는 등가점성감쇠이며, Fig. 2와 같이 E_D 는 이력면적에 의한 에너지 소산량이고 E_{S0} 는 최대변위가 발생했을 때의 변형 에너지이다.

일반적인 설계응답스펙트럼은 5% 감쇠비에 대하여 구해진 것이고 감쇠비에 따른 응답의 감소를 나타내기 위해서 감쇠비에 따른 감소계수 관계식이 구해져 있다. RG 1.60[8]에서는 감쇠비에 따른 몇몇 진동수에서의 응답스펙트럼 값이 주어져 있으며 이로부터 감쇠비 변화에 의한 응답감소계수를 추정할 수 있다. 계수값이 주어진 진동수들 중에서 면진시스템의 고유진동수와 가장 가까운 것은 0.25 Hz 이고, 이 진동수에서의 5% 감쇠비에 대한 스펙트럴 가속도를 각 감쇠비에 따른 스펙트럴 가속도로 나누어 응답감소계수를 산정하였다. ASCE 7-10[1]에서는 몇몇 감쇠비에 대하여 응답감소계수, B_D 가 주어져 있다. Lin and Chang[16]은 1000여개의 지진기록으

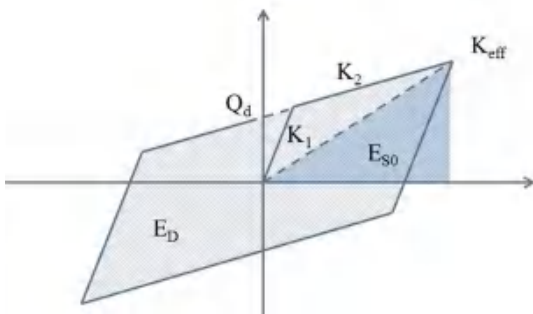


Fig. 2. Bi-linear hysteresis curve, effective stiffness and energy dissipation representing effective damping

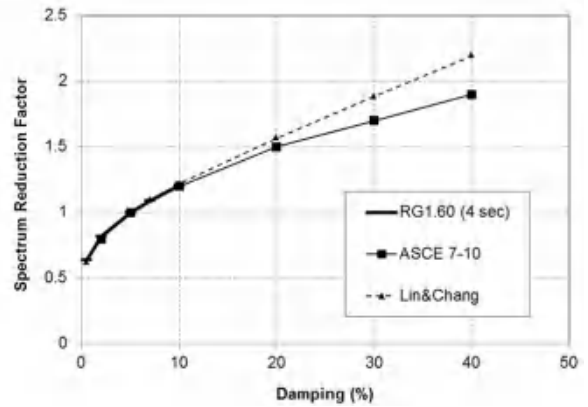


Fig. 3. Spectrum reduction factor by damping ratio

로부터 응답감소계수를 감쇠비에 대한 함수형태로 표현하였으며 그 변동성까지 평가하였다. 이들 스펙트럼 감소 계수는 Fig. 3에 도시하여 비교하였다. 약 10% 이내의 감쇠비에서는 세 방법 모두 차이가 없었고 감쇠비가 20%를 넘으면서부터는 다소 차이가 있었다. 그러나 일반적으로 설계변위에서의 면진시스템의 감쇠비가 40%까지는 이르지 않기 때문에 그 차이는 크지 않다고 할 수 있다. 이 연구에서는 실제 지진기록으로부터 얻어진 Lin and Chang의 모델을 적용하였다.

이중선형으로 모델링된 면진시스템의 고유진동수는 Fig. 2에서와 같이 유효강성으로부터 구해지는데 이는 응답변위의 최대값이 달라지면 변하게 된다. 응답변위가 작은 경우에는 유효강성이 초기강성과 같으며 항복 이후부터 점점 작아지기 시작하여 무한히 큰 변위에서는 이차강성 K_2 에 근접하게 된다. 따라서 응답변위가 커질수록 고유주기가 커져서 더욱 변위를 증가시키는 원인이 된다. 또한 감쇠비의 경우 항복 전에는 이력거동에 의한 에너지 소산이 없어서 기본 점성감쇠만 가지고 있다가 항복이후부터 증가하기 시작하여 주로 설계 변위 이전에 최대값을 가진다. 변위가 증가할수록 E_D 는 변위에 비례하여 증가하는 반면 E_{S0} 는 변위의 제곱에 비례하여 증가하므로 변위가 매우 커지면 이력면적에 의한 소산 에너지가 거의 무시되어 다시 기본점성감쇠 값으로 수렴하게 된다.

이러한 응답변위에 따른 수평하중, 등가강성, 유효진동수, 등가감쇠비와 응답감소계수 등의 관계를 예제모델에 대하여 도시하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 각 변수들은 변위에 따라서 달라지며 면진장치가 100% 변형률에 해당하는 250mm 변위를 넘어선 후에도 변화한다. 유효강성과 유효주기는 100% 변형률 이전에서만 변화가 크지만 100%이후에도 다소 변화가 있다. 유효감쇠의 경우는 100% 변형률 이전에 최대치를 가지며 그 이후에도 계속 감소하여 이에 따라 응답감소계수도 작아지게 된다.

단자유도 이중선형 거동으로 모델링된 면진시스템의 응답변위를 스펙트럼 상에서 계산하기 위해서는 우선 등가선형모델로 변환해야 한다. 최초 가정된 응답변위에 대해서 고유진동수와 감쇠비가 구해지며 이로부터 응답변위가 다시 결정되는데, 이 변위에 대해 등가강성과 등가감쇠비가 다시 바뀌므로 고유진동수와 응답감소계수가 재 산정되어야 한다. 따라서 고유진동수 및 감쇠비가 해당 응답변위와 일치할 때 까지 수렴되는 지점을 찾아야 한다. 이런 계산 과정은 ATC-40[17]에서 제시하고 있는 가속도-변위 응답스펙트럼 (Acceleration-Displacement Response Spectrum, ADRS) 방법으로 제시되어 있다. 이 ADRS 방법을 적용하여 예제 면진장치에 대해

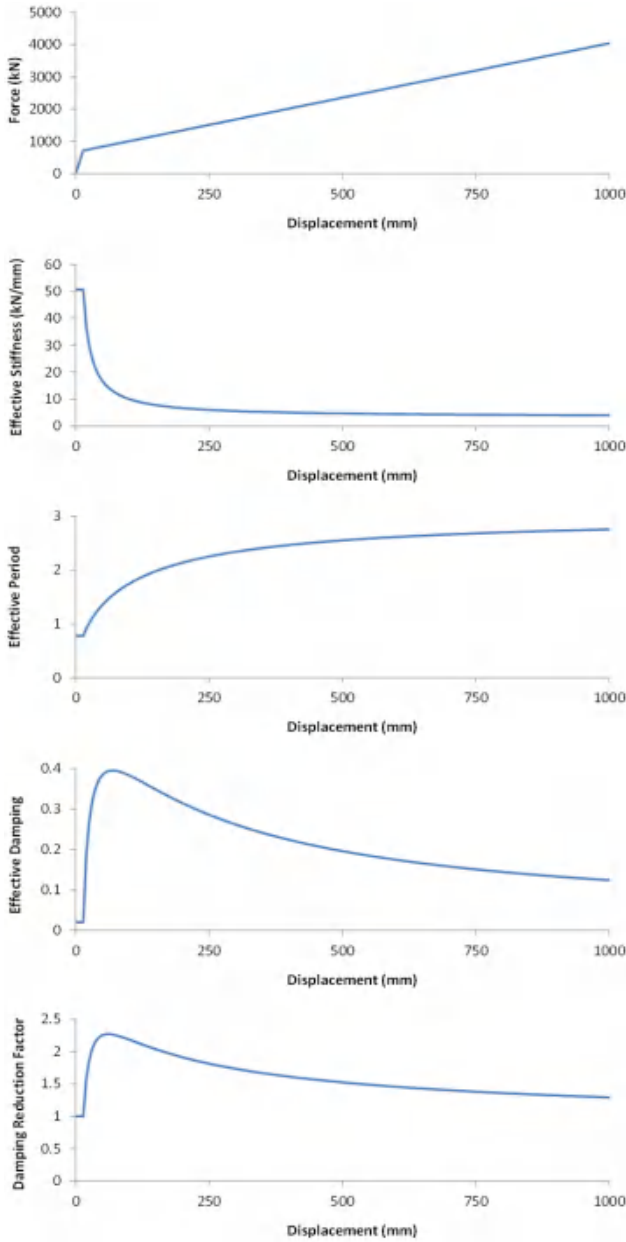


Fig. 4. Variables of isolation system according to the later displacement response

서 GMRS 스펙트럼에 의한 값을 계산하면 유효진동수는 0.434, 유효감쇠는 27.2 %, 응답변위는 279 mm로 계산되었다.

4.2 불확실성에 의한 면진시스템 응답변위의 변동성

4.2.2 면진장치 특성변수의 불확실성에 의한 응답변위 변동성

성능기반 설계에서는 확률론적 평가 방법을 사용하기 때문에 여러 가지 불확실성에 대한 해석을 수행해야 한다. NUREG 성능기준[3]에서 제시하고 있는 면진장치 특성변수들의 허용 변동성 기준은 90% 신뢰도로 $\pm 20\%$ 의 변동폭 안에 들어오는 것이다. 이를 변동계수 (coefficient of variance)로 환산하면 0.1로서 각 변수들이 평균값 대비 표준편차가 0.1인 경우를 의

Table 3. Distribution of isolator responses considering the uncertainty of mechanical property

	Disp. (mm)	Force (kN)	Damping (%)	Eff. Stiff. (kN/mm)	Eff. Freq. (sec)
Median	272.3	1596	27.3	5.86	0.437
σ_{in}	0.102	0.044	0.102	0.109	0.055

미한다. 면진장치의 특성변수들이 이와 같은 변동성 기준을 만족할 때 변위 응답의 분포를 구하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 불확실성 해석을 수행하였다. 면진장치의 이중선형 거동에 대한 변수 3가지(K_1 , K_2 , Q_d)에 대하여 각각 대수정규분포의 변동계수가 0.1이 되도록 랜덤 샘플을 만들었으며 이를 적용하여 ADRS 방법으로 각 케이스별 응답을 구하고 이에 대한 통계값을 구하면 Table 3과 같이 계산된다. 예제모델의 경우 특성변수의 변동성에 의해서 산정된 변위응답의 중앙값은 272.3 mm로서 변동성을 고려하지 않은 응답변위인 279 mm와 크게 차이 나지 않지만 대수표준 편차는 약 0.102로 계산되었다. 따라서 특성변수의 변동성을 고려하여 90%-ile에 해당하는 값을 구하면 중앙값 대비 약 13.9% 큰 값으로 계산된다.

4.2.2 입력지진의 불확실성에 의한 응답변위 변동성

동일한 설계응답스펙트럼에 의해서 단자유도 시스템으로 가정된 선형 탄성 응답변위는 하나의 값으로 정해진다. 그러나 면진시스템의 등가선형 모델은 원래 이중선형 모델이며, 이 경우 동일한 스펙트럼형상을 가지는 지반운동에 대해서도 비선형 거동에 의한 응답을 계산하면 값의 차이가 발생한다. 이러한 비선형 거동에 따른 입력지반운동에 대한 응답의 변동성은 기존 연구에서 평가되었다[18, 19]. Kim et al.[18]의 연구에서는 스펙트럼을 PGA 0.5 g 인 RG 1.60 스펙트럼을 사용한 것은 동일하지만 한 가지 면진장치 모델에 대한 예로 구해진 것이었고, Huang et al.[19]의 연구에서 비교적 다양한 이중선형 모델을 가정하여 변동성 평가가 수행되어 있어 그 결과를 사용하였다. Huang의 연구에서는 100% 설계지진과 150% 설계지진에 의한 이중선형 거동 응답변위의 변동성이 평가되었으며 각각의 경우 대수표준편차는 대략 0.1과 0.12로 산출되었다. 따라서 이 연구에서는 이 두 개의 표준편차를 GMRS와 EDB의 입력지진에 의한 변동성으로 각각 적용하였다.

4.2.3 수평 2방향 조합의 불확실성에 의한 응답변위 변동성

스펙트럼 상에서 면진시스템의 응답변위를 구하는 방식은 1축방향 입력지진에 의한 것만 고려된다. 그러나 실제로 면진시스템의 거동은 수평 2축방향 입력지진에 의하여 평면상에 궤적을 그리며 움직이고 이 경우 최대 응답변위는 매 시간단계마다 두 방향의 벡터합을 계산하여 가장 최대가 되는 변위로 택해야 한다. 설계응답스펙트럼은 수평 양방향으로 동일한 세기를 가지고 있기 때문에 충분한 강진지속시간을 가지는 경우 양방향 응답이 동시에 최대가 되는 순간이 존재할 수 있어서 2축방향 최대응답변위는 1축방향 최대응답 대비 $\sqrt{2}$ 배가 된다. 그러나 실제 지진시 양방향 응답이 동시에 최대가 되는 경우는 많지 않다. 이를 정량적으로 평가하기 위해 NGA Database [20]에서 PGA 0.3g 이상의 실제 계속지진 160여 개에 대한 단자

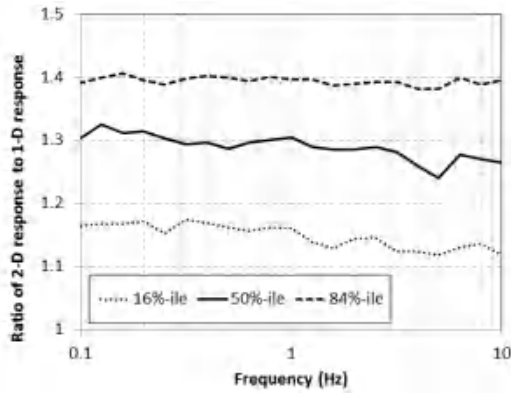


Fig. 5. Variation caused by vector sum of two orthogonal responses

유도 시스템의 시간이력 해석을 수행하여 1축방향 최대응답변위 대비 2축 벡터합의 최대응답변위 비를 단자유도계의 고유진동수에 따라 계산하였다. 이때 단자유도 시스템의 감쇠비는 면진시스템과 유사한 0.2를 적용하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 면진시스템의 고유진동수에 해당하는 약 0.5 Hz에서의 1축방향 대비 2축방향 응답비가 약 1.3 정도로 계산되었다.

5. 원전 면진의 성능기반 설계

5.1 설계초과지진 수준

이 연구에서 설계지진수준, 즉 GMRS는 PGA가 0.5g인 RG 1.60 스펙트럼으로 하고 있다. 이로부터 설계초과지진 수준인 EDB 설계스펙트럼을 가정하기 위해서는 GMRS 대비 EDB의 비율을 대략적으로 산정할 필요가 있다. 여기서는 원전 건설을 위한 특정 부지를 가정하지 않고 있기 때문에 실제로 지진재해도를 계산할 수는 없으며, 따라서 기존 연구에서 1×10^{-4} 대비 1×10^{-5} 발생빈도 수준에 대한 지진재해도 계산 자료들로부터 추정하였다. Kennedy[21]의 연구에서는 1×10^{-4} 대비 1×10^{-5} 재해도 값의 비율(A_R)을 미국 동부 지역과 서부 캘리포니아 지역에 대하여 진동수 1 Hz 및 10 Hz에 대해서 제시하였다. 면진시스템은 1 Hz 보다 낮은 고유진동수를 가지고 있기 때문에 이와 가까운 1 Hz 성분을 보면, A_R 이 미국 동부 지역에서는 3.27이고 미국 서부에서는 1.76으로 주어졌다. 또 다른 예로는 McGuire et al.[22]의 연구가 있으며, 여기서는 대표적인 미국 동부와 서부지역 한 곳씩에 대하여 100 Hz부터 0.2 Hz까지의 A_R 값을 계산하였다. 면진시스템의 고유진동수와 비슷한 0.5 Hz 대역의 A_R 값을 보면 미국 서부에서는 1.84이고, 동부지역에서는 2.05이다. 면진이 강진지역을 대상으로 한다는 가정하에 이 연구에서는 1×10^{-4} 대비 1×10^{-5} 재해도 수준을 대략적으로 약 2.0배로 가정하였고, 이에 따라 EDB는 PGA 1.0인 RG 1.60 스펙트럼으로 정의하였다.

5.2 설계초과지진에 의한 면진시스템 응답변위 분포

성능기반 면진원전의 설계를 위해서는 설계초과지진에 대한 응답변위의 확률분포를 구해야 한다. 우선 EDB의 1축방향 평균응답변위를 구하기

Table 4. Isolator responses by GMRS and EDB spectrum

	Disp. (mm)	Force (kN)	Damping	Eff. Stiff. (kN/mm)	Eff. Freq. (Hz)
GMRS	279	1609	27.2	5.77	0.434
EDB	897	3694	13.4	4.12	0.367

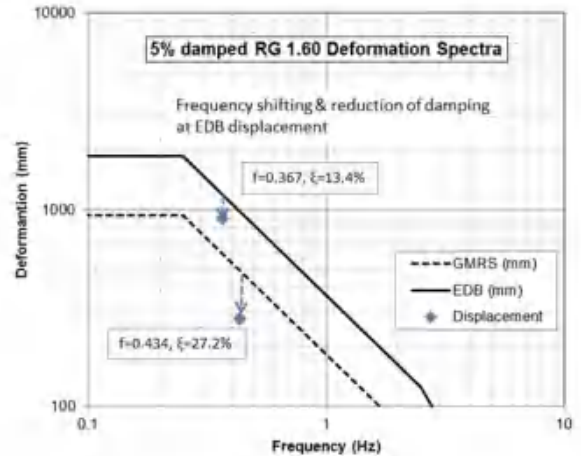


Fig. 6. Displacement response affected by frequency shifting and reduction of damping for the GMRS and EDB spectrum

위하여 GMRS를 2배하여 EDB로 변환한 다음에 ADRS 방법을 이용하여 응답변위를 계산하였으며, 앞서 GMRS에 대해서 계산된 응답값과 함께 정리한 결과는 Table 4와 같다. EDB 시에는 지진의 세기가 커졌기 때문에 변위응답이 더 크게 나오고, 그로 인해 면진시스템의 주기가 더 길어지고 감쇠비는 줄어들어 추가적인 변위가 더 발생한다. 따라서 지진의 세기가 2배가 되었지만 실제 응답변위는 약 3배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 주기 이동과 감쇠비에 의한 효과는 Fig. 6에서와 같이 GMRS와 EDB에 대한 변위응답스펙트럼으로부터 설명될 수 있다.

이렇게 구해진 EDB의 변위응답은 1축방향에 대한 것이고 여러 불확실성도 고려되지 않은 것이다. 따라서 1축 대비 2축 거동에 의한 증폭으로 중앙값을 1.3배 증가시켜야 하고 특성변수 및 입력지진에 의한 변동성을 고려하여 90%-ile 응답변위를 구해야 한다. 입력지진에 의한 변동성은 앞서 Huang[19]의 결과에서 150% 설계지진에 대해 계산된 대수표준편차인 0.12를 EDB인 경우에 적용하였고, 이는 2축 거동에 의한 변동성까지 포함한다고 할 수 있다. 앞서 GMRS에서와 마찬가지로 EDB일 경우에도 면진 장치의 세 가지 특성변수의 불확실성에 의한 응답변위의 변동성 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산하였으며 그 값은 대수표준편차가 0.063이었다. 이 값이 GMRS에 의한 표준편차보다 작은 이유는, EDB 입력 시 변위응답이 커지면서 감쇠비가 감소하여 상대적으로 유효감쇠에 의한 변동성이 줄었기 때문으로 판단된다. 입력지진에 의한 표준편차와 특성변수에 의한 표준편차의 합은 $\sqrt{0.12^2 + 0.063^2} = 0.135$ 로 계산된다. 응답변위는 확률분포를 대수정규분포로 가정하였으며 확률밀도함수의 90%-ile에 해당하는 값을 적용하여 예제모델의 EDB에 의한 90%-ile 변위를 계산하면 식 (5)의 값과 같다.

$$D_{EDB,90\% - ile} = D_{EDB,median by ADRS} \times 1.3 \times \text{EXP}[1.28 \times \sqrt{0.12^2 + 0.063^2}]$$

$$= 897 \times 1.3 \times 1.19 = 1,388 \text{ mm} \quad (5)$$

이와 같이 계산된 EDB 90%-ile 범위는 예제모델의 총 고무높이 250mm에 대해서 전단변형률로 약 555%이기 때문에 고무계열 면진장치의 전단파괴 한계변형률로 추정되는 400%를 초과하여 성능기반 설계방법에서 설계초과지진에 대해 충분한 성능을 가지고 있지 않다고 할 수 있으며, 따라서 예제모델의 경우 면진장치를 재설계 할 필요가 있다.

5.3 설계초과지진을 고려한 설계 범위 제안

예제모델과 같이 스펙트럼 상에서 단순 계산으로는 GMRS인 설계지진 세기에 대해 약 111% 변형률 응답이 발생하며, 2축 효과를 고려하더라도 약 145%의 변형률이 산정되기 때문에 면진장치의 선형 한계 범위에 들어와서 설계 단계는 만족하게 된다. 그러나 원전과 같이 성능기반 설계로 한다면 이는 설계초과지진에 대한 안전성 조건을 충족시키지 못하고 설계변형률을 보다 줄여야 한다. 따라서 응답 범위를 억제하거나 면진장치 자체의 한계변위를 키워 성능을 만족시키는 방향으로 설계가 개선되어야 한다.

응답범위를 줄이는 방법으로는 면진시스템의 목표 주기를 보다 짧게 하는 방법이 있다. 그러기 위해서는 고무의 경도를 높이거나 고무 단면의 지름을 크게 하여 2차강성을 키우는 방법과, 납플러그의 면적을 키워 특성강도를 크게 하여 등가강성을 높이는 방법이 있다. 주기를 짧게 만들기 위해서는 고무층의 높이를 낮춰 상대적으로 강성을 키우는 방법도 있으나 이는 한계 변위도 줄이기 때문에 상세 계산을 수행해봐야 한다.

응답범위를 억제하는 두 번째 방법은 감쇠비를 크게 하는 것이다. 이를 위해서는 납플러그의 면적을 크게 하여 특성강도 값을 키워 EDB에 의한 범위에서도 충분히 큰 감쇠를 가지도록 한다. 그러나 LRB가 유효한 거동을 보이기 위해서는 고무의 지름 대비 납플러그의 지름에 어느 정도의 제한이 있기 때문에 이 방법에도 한계가 있다. 이 경우 하나의 LRB에 여러 개의 납플러그를 심어 납플러그의 지름은 줄이면서도 면적을 늘려 특성강도를 키울 수 있는 대안이 있다.

목표 주기를 줄이는 방법으로 면진장치 설치 개수를 늘려서 1개당 작용하는 상부구조의 질량을 줄이는 방법도 있다. 하지만 원전의 기초판 크기가 정해져 있고, 면진장치의 설치와 유지보수를 위해서는 어느 정도 순간력을 유지해야하기 때문에 개수를 늘리는 데에도 제약이 있다.

이러한 다양한 방안들에 대하여 그 영향을 평가하기 위해 예제모델을 기준으로 면진장치를 재설계하고 GMRS 및 EDB에 의한 범위를 산정하였다. 예제모델의 변수들을 기본으로 하여 이로부터 하나씩만 변수를 바꿔가며 응답변위 및 변형률을 평가하였다. Table 5에서와 같이 고무의 직경, 고무의 경도, 납플러그의 직경, 고무의 높이, 총 면진장치의 개수 등을 변화시켰으며 각각에 대하여 예제모델에서 수정된 값만 표시를 하였다. 수정된 값으로부터 LRB의 이중선형 거동을 나타내는 세 변수를 산정하였으며 예제모델과 동일한 방법으로 GMRS와 EDB 입력지진에 대한 응답변위 및 총 고무높이에 대한 변형률을 산정하였다.

이 결과는 실제 설계 가능한 변수들의 범위가 정확히 제시되어야하기 때문에 어떤 방법이 낫다고는 평가하기 어려우나 각 변수들을 변화시켰을 때 EDB 성능기준에 어느 정도 근접할 수 있는지는 판단 할 수 있다. 우선은 응답범위를 줄여야하기 때문에 고무의 경도를 키우거나 직경을 키워서 2차강

Table 5. Design example of isolators and displacement responses by GMRS and EDB spectrum

		Base Case	Increase of Diameter of Rubber	Increase of Shear Modulus of Rubber	Increase of Diameter of Lead Plug	Increase of Height of Rubber	Decrease of Height of Rubber	Increase of Number of Isolator Unit	Acceptable Design
	Diameter of Rubber (mm)	1500	1800	-	-	-	-	-	1720
	Diameter of Lead Plug (mm)	320	-	-	360	-	-	-	350
	Total Height of Rubber (mm)	250	-	-	-	300	200	-	-
	Shear Modulus of Rubber (MPa)	0.5	-	0.7	-	-	-	-	0.7
	Number of Isolator Unit (EA)	600	-	-	-	-	-	800	-
	Vertical Load of Isolator Unit (kN)	7609	-	-	-	-	-	5707	-
	K ₁ (kN/mm)	50.6	73.9	70.8	50.0	42.2	63.3	50.6	93.5
	K ₂ (kN/mm)	3.37	4.93	4.72	3.33	2.81	4.22	3.37	6.24
	Q _d (kN)	670	670	670	848	670	670	670	801
ADRS Analysis (GMRS)	Displacement (mm)	279	248	245	217	287	256	184	193
	Eff. Frequency (Hz)	0.434	0.499	0.493	0.486	0.410	0.473	0.552	0.582
	Eff. Damping (%)	27.2	23.6	24.4	33.5	29.2	25.3	32.5	26.2
ADRS Analysis (EDB)	Displacement (mm)	897	776	768	803	987	829	693	634
	Eff. Frequency (Hz)	0.367	0.435	0.427	0.378	0.338	0.405	0.435	0.495
	Eff. Damping (%)	13.4	11.4	11.8	17.0	14.2	12.1	15.9	12.6
GMRS Displacement (mm)		362	323	319	282	373	332	240	251
GMRS Strain (%)		145	129	127	113	124	166	96	101
90%-ile EDB Displacement (mm)		1388	1201	1188	1242	1526	1282	1071	982
90%-ile EDB Strain (%)		555	480	475	497	509	641	429	393

성을 늘려 면진에 의한 고유진동수를 단주기 영역으로 이동 시킬 필요가 있다. 납플러그의 직경을 키우는 방법 또한 고유진동수도 이동시키고 감쇠 효과도 키울 수 있어 나은 대안으로 판단된다. 고무의 높이를 줄이는 것은 단 주기로 이동시키지만 한계변위 확보 측면에서 좋지 않고, 고무 높이를 늘려 한계변위를 증가시키는 것도 효과가 있지만 주기가 길어져서 응답변위 자체가 상당히 늘어나므로 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것이다. 장치 개수를 늘려 전체적으로 고유진동수를 감소시키면 그 효과가 크지만 이는 시공 및 유지보수의 문제가 더 크기 때문에 현실적으로 적용이 어려울 수 있다.

예제모델의 경우 한 가지 조건만을 바꿔서는 설계초과지진시의 조건을 만족시키기 어려웠다. 만족시키기 위해서는 두 가지 이상의 변수들을 바꿔야 할 필요가 있다. Table 5의 마지막 열인 설계만족에는 고무직경, 납직경, 고무전단탄성계수의 3가지 변수를 바꾼 것이다. 이와 같은 설계조건은 90%-ile EDB 변형률을 400% 이하로 낮춰서 목표로 하는 성능을 만족시킬 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 원전의 성능기반 내진설계 개념에 맞춰 면진장치의 설계 값 범위를 어떻게 정해야 할지 논의하였다. 복잡한 시간이력 해석이 아닌 스펙트럼 값으로부터 비교적 단순화된 방법을 적용하여 계산하는 절차를 개발하였고 이로부터 LRB 면진장치의 예제모델을 통해 설계초과지진에 대한 면진장치 변형 성능의 적합성을 평가하였다. 실제로 원전의 성능기반 설계기준을 맞추기 위해서는 설계에서 고려하는 변위보다 충분한 여유도를 확보해야 함을 확인할 수 있었다. 그러나 원전의 경우 기초판 크기에 따른 면진장치의 설치 가능 개수의 제한이나 면진시스템의 과도한 장주기화에 의한 면진-비면진 사이 연결 배관의 상대변위 증가량 제한 등 여러 제약조건들이 있고 이러한 제약조건이 면진장치의 설계 변수들과 상호 연관되어 있어 설계초과지진까지 성능을 확보하는 설계가 쉽지만은 않은 상황이다. 대체적으로 설계시의 변형률은 2축방향 거동을 고려하여 100% 내외가 되어야 할 것이며 이를 위해서는 면진시스템의 설계 주기가 2초 이내로 되어야 할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014151010170C)

/ REFERENCES /

1. ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10, Reston VA: American Society of Civil Engineers; 2010. 608 p.
2. ASCE, Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, ASCE/SEI 43-05, Reston VA: American Society of Civil Engineers; 2005. 81 p.
3. Kammerer AM, Whittaker AS, Constantinou MC. Technical considerations for seismic isolation of nuclear facilities, NUREG (Draft), Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 2014.
4. USNRC, A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide, 1.208, Washington, DC: U.S Nuclear Regulatory Commission; 2007. 24 p.
5. Japan Electric Association, Design and Technical Guideline of Seismic Isolation Structure for Nuclear Power Plant, JEAG 4614-2000, Nuclear Standard Committee of JEA; 2000. (in Japanese, only).
6. ESC, Anti-seismic devices, BS EN 15129, European Standards Committee; 2010. 162 p.
7. Forni M, Guidelines proposal for seismic isolation of nuclear power plant, ENEA Report RdS/2010/86, 2010. 22p.
8. USNRC, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide, 1.60, Washington, DC: U.S Nuclear Regulatory Commission; 1973. 6 p.
9. Mizukosh K, Yasaka A, Iizuka, M, Failure Test of Laminated Rubber Bearings with Various Shapes, 10WCEE; 1992 Jul 19-24; Madrid, Spain. 2277-2280.
10. Yabana S, Kanazawa K, Nagata S, Kitamura S, Sano T, Shaking table tests with large test specimens of seismically isolated FBR plants, 3; Ultimate behavior of upper structure and rubber bearings, Proceedings of 2009 ASME PVP; 2009 Jul 26-30; Prague, Czech. 179-187.
11. Feng D, Miyama T, Masuda K, Liu W, Zhou F, Zheng B, Li Z, A detailed experimental study on chinese lead rubber bearing, 12WCEE, 2000 Jan 30-Feb 4 Auckland; New Zealand. Paper No. 202 p.
12. Takaoka E, Takenaka Y, Nimural A, Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender base-isolated structure supported by laminated rubber bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011 Aug;40:551-570.
13. Kikuchi M, Nakamura T, Aiken ID, Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010 Sep;39:1513-1531.
14. Minowa C, Masaki N, Iiba M, Large scale dynamic failure tests of low damping rubber base isolators, 12WCEE, 2000 Jan 30-Feb 4 Auckland; New Zealand. 1344 p.
15. Aiken ID, Kelly JM, Clark PW, Tamura K, Kikuchi M, Itoh T, Experimental studies of the mechanical characteristics of three types of SI bearings, 10WCEE; 1992 Jul 19-24; Madrid, Spain. 2281-2286.
16. Lin YY, Chang KC, Effects of site classes on damping reduction factors, ASCE Journal of Structural Engineering, 2004 Nov;130(11): 1667-1675.
17. ATC, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Report ATC-40, Redwood City, CA: Applied Technology Council; c1996.
18. Kim, JH, Kim MK, Choi I, Response of Base Isolation System Subjected to Spectrum Matched Input Ground Motions, EESK J, Earthquake Eng. 2013 Mar;17(2):89-95.
19. Huang Y, 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, Buffalo NY: MCEER, 2009, 136 p.
20. PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center NGA Database, Available from: <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
 21. Kennedy RP. Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants, Nuclear Engineering and Design, 2011 Mar; 241(3): 648-656.
 22. McGuire RK, Silva WJ, Costantino CJ. Technical basis for revision of regulatory guidance on design ground motions: Development of hazard- and risk-consistent seismic spectra for two sites, NUREG/CR-6769. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, c2002.