

원자력발전소 면진적용을 위한 기존 설계식의 적용성 검토

Evaluation of the Applicability of Existing Design Formula for Seismic Isolation to Nuclear Power Plants

김현욱^{1)*}

Kim, Hyun-Uk^{1)*}

¹⁾한수원 중앙연구원 플랜트건설기술연구소

¹⁾Plant Construction & Engineering Office of KHNP Central Research Institute

/ A B S T R A C T /

Involvement in a research for the application of seismic isolation to the nuclear industry, this study evaluates firstly the responses of seismic isolation system considering general ranges of structural period and damping ratio by using preliminary design formula. Secondly, coupling effects of input motions were evaluated to find out appropriate conditions of excitations and effect of the iteration for calculating yield displacement of lead core was also assessed in terms of response of a seismically isolated structure. Finally, the results of preliminary design calculation were compared with those of dynamic analysis and the propriety of the formula was evaluated and appropriate ranges of reduction factor were also suggested from the results.

Key words: Nuclear Power Plants, Seismically Isolated Structure, Seismic Isolation System, Preliminary Design Formula, Dynamic Analysis

1. 서론

원전의 면진기술은 현재까지의 적용사례가 극히 드물지만, 근래에 들어 전 세계적으로 강화되고 있는 내진관련 규제기준에 대한 부담을 완화시키고 강진 지역으로의 수출 경쟁력 확보를 위해 관련 기술 및 지침의 개발이 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

일반 산업계의 경우, NEHRP Recommended Provisions[13,14], ASCE 7-10[6], AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design[5] 등의 면진설계기준이 개발되어 실제 건축물 및 교량설계에 적용되어 왔으며, 원전산업계의 경우에도 일본의 원전 면진 규제기준 JNES-SS-1001[11]과 설계기준인 JEAG-4614[10]가 제시된 바 있으나, 미국 원자력 규제위원회는 일부 기술적 견해 차이와 장기 거동에 대한 안전성 확보 등을 이유로 면진 규제지침을 새롭게 개발중에 있다. 국내의 경우, 대부분의 원전 내진 규제기준 및 설계기준이 미국의 기준을 준용하고 있으며 면진구조 설계기준은 제시되어 있지 않지만 이러한 기존 내진설계기준들과의 연관성을 고려하여 개발될 예정이다.

본 논문은 원전의 면진 기술 적용을 위한 초기단계 연구로서 현재까지 제시된 일반산업계의 면진설계 기준과 절차에 근거하여 면진반침을 설계하고 동적해석에 근거하여 일부 질량점 및 강성정보가 수정된 APR 1400 원전 구조물의 적절한 가진 조건 설정 및 면진의 효과 등을 확인하였으며, 최종적으로 예비설계식의 적용성 및 적절한 응답 감소계수 설정에 대해 고찰해 보았다.

2. 입력 지반운동

원전 구조물은 부지고유 설계단계 이전에 건설부지 및 환경조건의 불확실성을 고려한 표준설계 과정[2]이 존재한다. 표준설계단계에서의 원전은 통제점(설계 스펙트럼 및 지진하중 정의의 위치)이 하부 기반암이 아닌 지표면 또는 기초높이로 정해지기 때문에 해당 높이에서의 설계응답스펙트럼은 지반 종류와 관계없이 모두 동일한 것으로 정의된다. 물론 지반-구조물 상호작용 효과를 고려하게 될 경우, 응답결과로 산정되는 스펙트럼은 입력 스펙트럼의 형태와 다르게 산정되나 본 연구에서는 간단하게 지반-구조물 상호작용 영향을 고려하지 않기로 한다.

본 연구에 적용된 설계응답스펙트럼[2]은 US NRC의 RG 1.60 스펙트럼[16]을 기반으로 고진동수 영역을 보강한 형태로서 ZPA(Zero Period

*Corresponding author: Kim, Hyun-Uk

E-mail: gomzee@khnpp.co.kr

(Received 28 September 2012; Accepted 20 November 2012)

Acceleration) 는 0.3 g이며, 응답 스펙트럼상 1초 주기 스펙트럼 가속도는 0.44 g로 나타났다. 동적해석에 이용된 3방향 1세트의 가속도 시간이력은 SRP 3.7.1[17]에 의거하여 총 지속시간 20.48 sec, 강진지속시간 7 sec 및 상관계수 0.16 이하 조건으로 설계응답스펙트럼에 부합하도록 작성되었다.

3. 면진시스템 설계인자 및 기존 설계절차 분석

3.1 면진받침에 대한 고려사항

면진받침은 크게 탄성받침과 미끄럼 받침으로 분류[7]된다. 이중 탄성 받침에는 저감쇠 고무 받침, 납-고무 받침 및 고감쇠 고무 받침 등이 있으며, 미끄럼 받침에는 마찰형 포트받침, 마찰 진자형 받침 등이 있다.

탄성받침은 종류에 따라 감쇠비의 차이를 보이는데 저감쇠 고무받침은 약 2~5%, 고감쇠 고무받침은 약 8~13%, 본 연구에서 고려 대상이 되는 납-고무 받침은 약 15~30%의 분포를 보인다.

3.2 면진 시스템 예비설계

3.2.1 예비설계 절차

NEHRP Recommended Provisions[13,14], ASCE 7-10[6] 기준에 의한 면진 시스템 설계절차는 Fig. 1과 같이 등가 수평 하중법(ELF, Equivalent Lateral Force Procedure) 에 의한 예비설계 단계와 동적 해석에 의한 검증 및 상세 설계 단계로 나눌 수 있다.

면진 시스템 예비설계단계에서는 먼저, 해당 부지에서 암반지반을 기준으로 한 지반운동 수준을 결정한다음 실제 지반조건을 고려하여 구조물 응답가속도를 결정하게 된다. 다음으로 면진 시스템의 유효 주기(T)와 유효 감쇠비(β)를 가정하면 아래의 식 (1)에 의해 발생변위(D)를 산정할 수 있다. 본 대상 구조물의 경우, 편심의 영향이 적도록 일부 질량점과 강성정보를 수정하였으며 동적해석결과와의 비교를 위해 우발 편심은 고려하지 않기로 하여 변위 산정에 식 (1)을 이용하였다. 여기서, g는 중력가속도, S_{M1}은 최대고려지진에 대한 1초 주기 5% 감쇠조건 스펙트럼 가속도 계수이며, T는 면진시스템 유효주기, B는 면진시스템 유효 감쇠비(β)에 대한 감쇠계수로 식 (2)에 의해 정의된다.

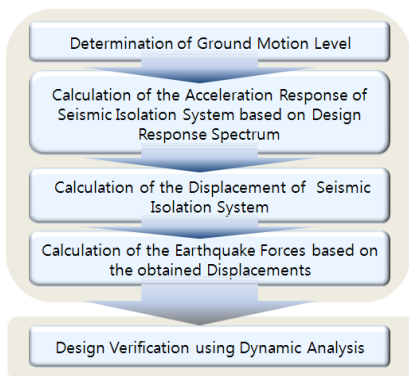


Fig. 1. Design Procedure of Seismic Isolation System (NEHRP[14])

$$D = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{S_{M1} T}{B} \tag{1}$$

$$B = \left[\frac{\beta}{0.05} \right]^{0.3} \tag{2}$$

예비설계단계에서 식 (3)을 이용하면 면진 적용 구조물의 최소강성 (K_{min})을 산정할 수 있고, NEHRP[13,14] 및 ASCE 7-10[6]에서 제시하는 ±15%의 강성편차를 고려할 경우, 식 (4)에 의해 설계를 위한 면진시스템 최대 강성(K_{max})을 산정할 수 있는데, 최대강성은 면진받침 상부 구조의 수평력(V_s) 산정에 이용된다. 여기서, W는 상부 구조물 자중이며 R_I는 응답 감소계수로 1보다 크나 2를 넘지 못하므로 본 연구에서는 우선적으로 1.5를 적용해 보기로 하였다.

$$K_{min} = \frac{4\pi^2}{g} \cdot \frac{W}{T^2} \tag{3}$$

$$K_{max} = 1.3 \times K_{min} \tag{4}$$

$$V_s = \frac{K_{max} \times D}{R_I} \tag{5}$$

3.2.2 설계인자 영향 분석

면진 시스템 예비설계단계 설계인자인 유효 주기와 유효 감쇠비에 대해 2.0 sec와 20%를 기준으로 하여 일반적인 유효 주기와 유효 감쇠비 범위에서의 발생변위와 받침 상부구조의 수평력을 산정해 보았다. 그 결과, 유효 주기 변화에 따른 변위와 받침 상부구조의 수평력은 최대 3배까지 차이를 보였으나 유효 감쇠비 변화에 따른 차이는 최대 1.4배 정도로 일반적인 유효 주기와 유효 감쇠비 범위에서 주기 변화의 영향은 감쇠비 변화에 의한 영향보다 면진시스템의 응답에 2배 이상 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Calculated Displacements in the Considered Ranges of Effective Stiffness and Damping Ratio

T=2.0 sec	β =10 %	β =20 %	β =30 %
	178.2 mm	144.7 mm	128.2 mm
β =20 %	T=1.0 sec	T=2.0 sec	T=3.0 sec
	72.3 mm	144.7 mm	217.1 mm

Table 2. Calculated Horizontal Force above Isolators in the Considered Ranges of Effective Stiffness and Damping Ratio

T=2.0 sec	β =10 %	β =20 %	β =30 %
	730,533 kN	593,377 kN	525,417 kN
β =20 %	T=1.0 sec	T=2.0 sec	T=3.0 sec
	1,186,755 kN	593,377 kN	395,585 kN

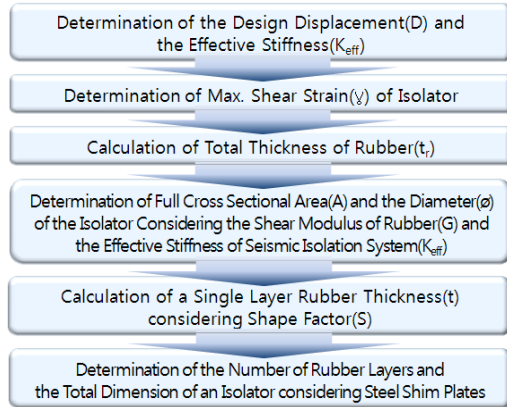


Fig. 2. Design Procedure of Rubber Bearing (Mayes and Naeim[8])

3.3 면진받침의 설계

3.3.1 저감쇠 및 고감쇠 고무 받침 설계절차

면진 시스템 설계에서 유효강성과 발생변위 및 소산 에너지(ΣE_D)가 구해지면, 먼저 발생변위에 대한 전단변형률을 가정하여 고무층 전체두께를 산정하게 된다. 고무층 전체 두께와 함께 전단강성과 면진시스템 유효강성을 고려하면, 받침의 단면적과 직경을 산정할 수 있고 일반적으로 추천되는 1차 형상계수 범위를 고려하여 고무 1개층 두께를 산정하게 되면 충분한 두께의 철판을 고려하여 받침의 전체 규격을 산정할 수 있게 된다. 본 절차중 1차 형상계수를 고려한 고무 1개층 두께 결정 및 후속과정으로 수반되는 연직강성(K_v) 결정절차는 납-고무 받침에도 동일하게 적용될 수 있다.

3.3.2 납-고무 받침 설계절차

납-고무 받침의 경우도 마찬가지로 유효강성, 발생변위 및 소산 에너지

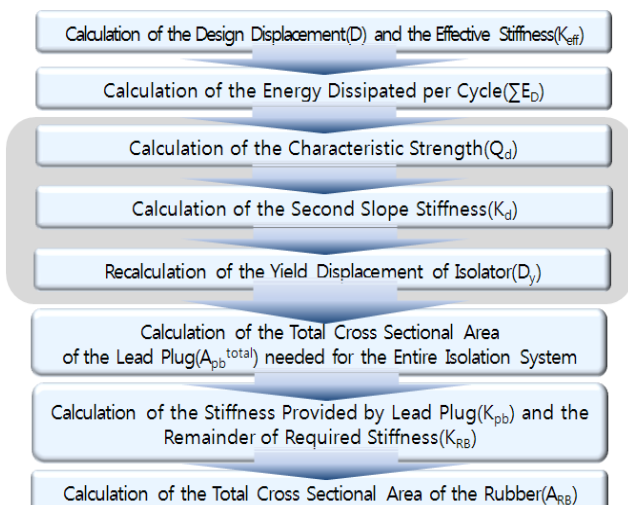


Fig. 3. Design Procedure of Lead-Rubber Bearing (Mayes and Naeim[8])

Table 3. Yield Displacements of Lead Core obtained by Iterative Calculation

T=2.0 sec	Iter. No.	$\beta=10\%$	$\beta=20\%$	$\beta=30\%$
	1	4 mm	7 mm	13 mm
2	-	8 mm	16 mm	
3	-	-	17 mm	
$\beta=20\%$	Iter. No.	T=1.0 sec	T=2.0 sec	T=3.0 sec
	1	4 mm	7 mm	11 mm
2	-	8 mm	12 mm	

를 이용하면, 납심의 항복 변위(D_y) 가정에 의해 납의 항복 특성값(Q_d)을 산정할 수 있는데, 통상적으로 납심의 항복변위가 발생변위에 비해 훨씬 작음을 감안하여 예비설계단계에서는 $D_y=0$ 을 가정[8]한다. 계산된 납의 항복 특성값은 납심 단면적(A_{pb}^{total}), 납심 강성(K_{pb}) 및 고무층 강성(K_{RB})산정에 이용되며 발생변위에 대한 전단변형률을 가정하면 최종적으로 고무층 단면적(A_{RB})을 산정할 수 있게 된다.

3.3.3 면진받침 설계절차에 대한 고찰

납-고무 받침의 설계시, 발생변위와 유효강성 및 소산 에너지로부터 납의 항복 특성값과 1, 2차 강성(K_u , K_d)을 산정하기 위해서는 우선적으로 납의 항복변위를 $D_y=0$ 으로 가정한다.

$$\Sigma E_D = 2\pi K_{eff} D^2 \beta_{eff} = 4Q_d (D - D_y) \quad (6)$$

$$K_d = K_{eff} - Q_d / D \quad (7)$$

$$D_y = Q_d / (K_u - K_d) \quad (8)$$

그러나, 식 (6)~(8)의 과정을 통해 산정된 납의 항복변위는 초기 가정 ($D_y=0$)과 다르기 때문에 시산에 의해 정확한 값을 확인해 볼 필요가 있다. 이때, 1, 2차 강성 비율(K_u/K_d)은 기존 시험사례들에 근거하여 통상적으로 약 10 정도의 범위에 있는 것으로 고려한다.

시산에 의해 산정된 납의 항복변위는 초기 가정값과 차이를 보이는데, 유효 감쇠비가 커질수록 그 차이는 커지며 시산 횟수도 늘어나는 경향을 보이므로 $\beta=30\%$ 조건에 대해서는 5절에서 추가적으로 시산 유무에 따른 응답 차이를 고찰해보기로 한다.

4. 동적해석에 의한 면진효과 분석

4.1 면진받침 입력 파라미터 결정

동적해석은 상용프로그램 SAP2000을 이용하였으며, 받침 형식으로는 납-고무 받침을 대상으로 하였다. 받침 제원을 결정하기 위한 면진 시스템 유효 주기는 JEAG-4614[10]의 기기 및 배관계 설계가 가능한 권고치 범위(1~2 sec)를 고려하여 2 sec, 유효 감쇠비는 20% 및 30%로 하였다. 상

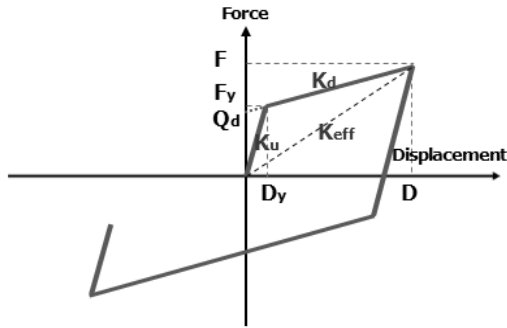


Fig. 4. Bi-linear Model of Isolator

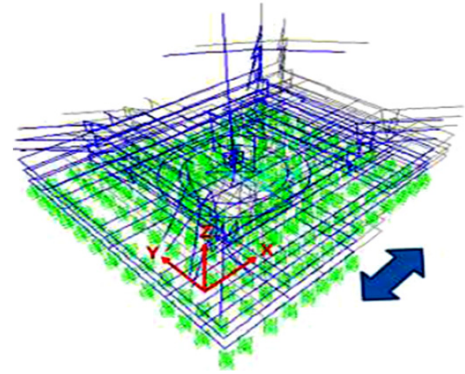


Fig. 5. Mode Shape of 1st Mode of the Seismically Isolated Structure

Table 4. Input Parameters for the Bi-linear Model of an Isolator

T=2 sec	$\beta =20\%$	$\beta =30\%$
D (mm)	145	128
K_{eff} (kN/m)	22,516	
D_y (mm)	8	17
Q_d (kN)	1,084	1,568
K_d (kN/m)	15,029	10,284
K_u (kN/m)	150,293	102,840
F_y (kN)	1,204	1,743
K_v (kN/m)	8,051,424	5,540,216

※ Yield Displacement and the Other Input Parameters were obtained by Iterative Procedure

Table 5. Modal Analysis Results of the Seismically Isolated Structure

Mode	Period (sec)	Modal Participating Mass Ratio			Mode Shape	
		x Dir.	y Dir.	z Dir.		
1st	1.987	0.999	1.09E-6	8.23E-12	Translation	x Dir.
2nd	1.985	1.09E-6	0.999	4.33E-15		y Dir.
3rd	0.183	8.68E-15	2.32E-6	3.91E-13	Rotation	Axis x
4th	0.182	2.77E-6	1.92E-14	1.32E-09		Axis y

기 면진받침의 해석에는 등가선형모델을 반복적으로 이용하거나 이중선형 (Bi-linear) 모델 혹은 삼중선형(Tri-linear) 모델을 이용하는데, 본 연구에서는 이중선형 모델이 이용되었다. 입력 파라미터는 해당 유효 주기와 유효 감쇠비를 만족하는 면진 시스템 변위에 대해 면진 시스템 유효강성과 소산 에너지를 고려하여 Table 4와 같이 산정하였다. 이는 면진 시스템 전체에 대한 이중선형 모델특성을 바탕으로 면진받침의 총 수량을 고려하여 선형적으로 산정한 값들이다.

연직강성(K_v)은 JEAG-4614[10], NEHRP Recommended Provisions [13,14] 및 Mayes and Naeim[8] 의 설계절차에 의거하여 고무층의 1차 형상계수 $S=10$ 과 일반적인 전단탄성계수 $G=400$ kPa을 고려하여 압축 탄성계수(E_c)를 먼저 산정한 다음, 산정된 압축 탄성계수를 이용하여 최종적으로 아래의 식 (10)에 의해 산정하였다. 여기서, 철판 면적(A_s)은 고무면적과 동일한 것으로 간주하였으며, 체적탄성계수(K)는 고무계열 받침에서 1,000~2,500 MPa 범위로 분포하는데 해당 범위 내에서 연직강성 차이는 약 10% 내외로 계산되므로 본 연구에서는 체적탄성계수를 일반적으로 이용하는 $K=2,000$ MPa을 적용하는 것으로 하였다.

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2 + K} \tag{9}$$

$$K_v = \frac{E_c A_s}{t_r} \tag{10}$$

4.2 해석결과

4.2.1 모드해석 결과

면진 적용시 구조물의 동적특성을 고정지반 조건과 비교하기 위해 고정지반 조건과 면진적용 조건에 대해 각각 모드해석을 수행하였다. 고정지반 조건의 경우 1차 모드 고유주기가 0.19 sec 이며 회전 모드형상을 나타내는 반면, 면진 적용된 경우는 면진받침 설계에 따라 1차 모드 고유주기가 약 2 sec를 나타내며 Fig. 5에서와 같이 병진 모드형상을 나타내었다. Table 5는 면진 적용 구조물의 각 모드별 질량 참여율과 모드형상을 나타낸다.

4.2.2 동적해석 결과

(1) 가진 조건의 영향 검토

동적해석에 의한 면진적용 효과 분석을 위해서는 보수적이면서도 합당한 가진 조건의 결정이 선행 되어야 한다. Mokha 등[12]은 마찰받침의 실험결과에 의거하여 수평방향 입력운동의 조합 효과를 반영하지 않을 경우 변위는 과소, 전단력은 과대평가 될 수 있다고 하였으며, Ryan 등[15]은 수평방향과 연직방향운동의 조합 효과 또한 응답에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 하였다. 이에 면진적용 효과 분석에 앞서 유효 감쇠비 20% 조건의 해석을 통한 합당한 가진 조건을 우선적으로 결정해 보기로 하였다.

해석 대상구조물의 모드해석결과 1차 모드형상이 x방향 병진으로 나타났으며, x방향과 y방향에 대해 각각 입력지진파를 적용하여 해석한 결과 또

한 x방향 응답이 우세한 것으로 나타났으므로 입력 운동 조합 영향 검토 및 가진 조건 결정은 x방향 응답에 대한 y방향과 z방향 입력운동의 영향을 검토하는 것으로 하였다.

Table 6의 조건에 따라 수행된 해석의 가속도, 변위 및 전단력의 x방향 응답결과는 Table 7과 같다. 입력운동의 수평방향 조합을 고려하지 않은 조건 1의 경우는 조건 2와 비교할 때 차이를 보이나, 전단력을 과대평가 했던 기존 연구결과와는 반대의 경향성을 보였다.

입력운동의 연직방향 성분의 조합을 고려하지 않은 경우는 조건 2와 조건 3의 비교를 통해 그 결과가 거의 동일하다는 것을 알 수 있으나, 이는 전단변형에 따른 면진받침의 연직강성 저하를 반영할 수 없는 면진받침 모델(비선형 링크 요소)이 이용되었기 때문인 것으로 판단되므로 추후 고체요소 등을 이용한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

상기 결과를 종합해 볼 때, 일방향 가진시 응답결과는 3방향 가진시와 비

교시 가속도만이 보수적인 것으로 나타났기 때문에 면진적용 효과 분석 및 예비설계식 적용성 평가를 위한 가진 조건은 실제와 유사한 세방향 입력 지진운동의 동시 적용으로 하였다.

(2) 면진적용 효과 분석

예비설계식과 동적해석 결과에 의거하여 가속도와 변위에 대한 면진적용 효과를 비교 분석해 보았다. 먼저, 예비 설계식에 의한 면진적용 효과를 분석하기 위해 비면진 구조물의 변위는 5% 감쇠비 설계응답 스펙트럼에서 고정지반 구조물의 모드 해석결과 산정된 1차 모드 고유주기 0.19 sec에서의 스펙트럼 가속도(S.A) 0.84 g를 아래의 식에 적용하여 산정하였다. 반면, 면진 적용 구조물의 스펙트럼 가속도는 2초 주기에서의 값인 0.25 g 대신 설계식의 정의에 따라 1초 주기에서의 값인 0.44 g를 적용하였다.

$$D = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{S.A \cdot T^2}{B} \tag{11}$$

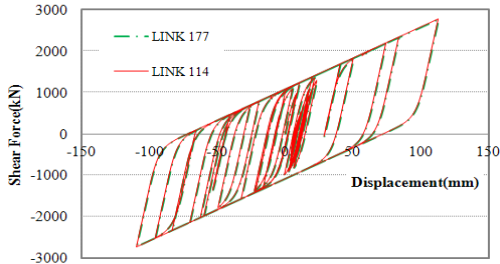
예비설계식에 의한 가속도 및 발생변위 비교 결과, Table 8에서와 같이 면진 적용 구조물의 경우가 비면진 구조물에 비해 가속도는 절반 수준인 반면, 변위는 18배 증가함을 확인할 수 있었다.

다음으로 동적해석에 의한 면진적용 효과를 분석하기 위해 설계응답스펙트럼에 부합하는 3방향 1세트 가속도 시간이력을 ZPA 0.3 g 수준으로 작성하여 비면진과 면진 적용 경우에 대해 각각 적용 하였으며, 구조물의 데이터 샘플링 위치는 Fig. 7(b)의 절점들로 하였다. 면진이 적용되지 않은 구조물의 가속도 응답 크기는 구조물 바닥과 최상부의 응답이 약 0.3 g와 1.3 g 수준으로 큰 차이를 보이나, 면진이 적용된 경우는 구조물 바닥과 상부의 응답이 미미한 차이를 보이며, 그 크기 또한 비면진 대비 기초높이에서는 약 40%, 최상부에서는 약 10% 수준까지 감소됨을 확인할 수 있었다. 면진 적용에 따른 가속도 응답성분의 장주기화는 Fig. 8(a)와 9(a)의 비교를 통해 확인 가능하며 Fig. 9(a)의 절점 3715번에 나타난 일부 단주기 응답성분은 푸리에 변환 결과, 3, 4차 모드에서 나타나는 회전 모드의 영향인 것으로 판단되었다. 면진 적용 구조물의 변위 응답 또한 가속도 응답과 마찬가지로 구조물 바닥과 상부 응답간 차이가 크지 않았으나, 최대 12 mm 변위를 나타낸 비면진 경우와 비교할 때 최대 약 11배의 차이를 보였다.

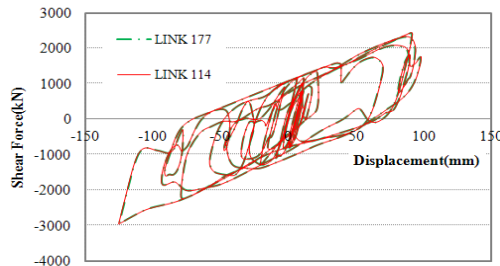
ASCE 7-10[6]에 의하면, 면진구조물은 각층의 높이에 대한 최대 상대 변위율(Drift Ratio, D_R)이 1.5% 이내이어야 함을 명시하고 있는데 본 해

Table 6. Load Cases to Determine Appropriate and Conservative Conditions of Coupling of Motions

Excitation Dir.	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Remark
x	0.3 g	0.3 g	0.3 g	x Dir. Responses for Each Condition
y	-	0.3 g	0.3 g	
z	-	-	0.3 g	



(a) Force-Displacement under 1 Directional Excitation



(b) Force-Displacement under 2 Directional Excitation

Fig. 6. Coupling Effects of Components of Motions

Table 7. Responses of the Seismically Isolated Structure in Different Load Cases

	No. 3715		No. 177
	Acc. (g)	Displ. (mm)	Shear Force (kN)
Cond.1	0.150	115	2,779
Cond.2	0.145	127	2,942
Cond.3	0.145	127	2,942

* Acceleration and Displacement - Fig. 7(b), Shear Force - Fig. 7(a)

Table 8. Isolation Effects - Calculation by Design Formula

		Results	Ratio ② to ①	
Period (sec)	Non-Isolated(①)	0.19	1,053 %	
	Isolated(②)	2.0		
Acc. (g)	Non-Isolated(①)	0.84	52 %	
	Isolated(②)	0.44		
Displ. (mm)	Non-Isolated(①)	8	Max. 1,810 %	
	Isolated (②)	$\beta=20\%$		145
		$\beta=30\%$		128

* $\beta=5\%$ was applied to Non-Isolated Structure

Table 9. Isolation Effects - Dynamic Analysis Results

		Results	Ratio ② to ①	
Period (sec)	Non-Isolated(①)	0.19	1,053 %	
	Isolated(②)	2.0		
Acc. (g)	Non-Isolated(①)	0.30 (Bottom) / 1.29 (Top)	Max. 10 % (Top) 40 % (Bottom)	
	Isolated (②)	$\beta=20\%$		0.13 (Bottom) / 0.15 (Top)
		$\beta=30\%$		0.12 (Bottom) / 0.13 (Top)
Displ. (mm)	Non-Isolated(①)	12 (Top)	Max. 1,058 %	
	Isolated (②)	$\beta=20\%$		127 (Top)
		$\beta=30\%$		111 (Top)

※ $\beta=5\%$ was applied to Non-Isolated Structure

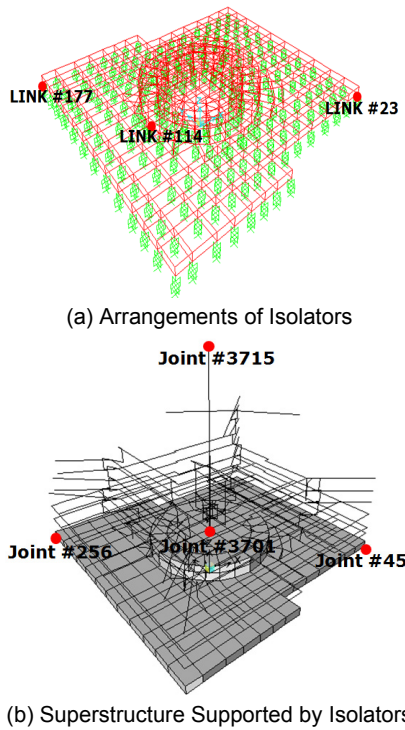
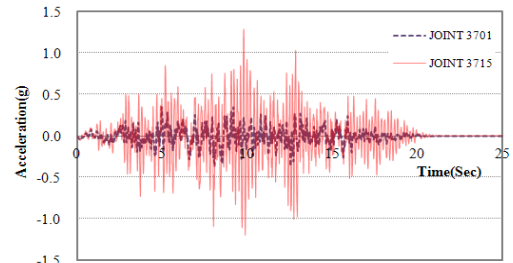


Fig. 7. Data Sampling Points of the Structure

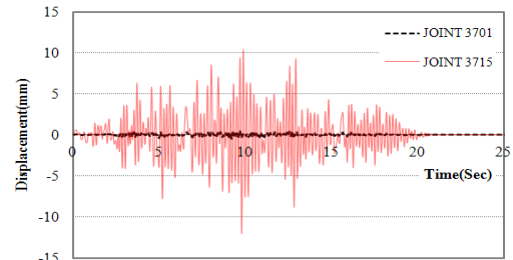
석대상 구조물의 경우, 면진 적용시 최상부층과 최하부층의 상대 변위율인 Roof Drift Ratio가 약 0.002 % 미만으로 사실상 강제운동에 가까운 거동을 보이므로 구조물 상/하부 응답차이를 포함한 상기의 동적해석결과에 의거할 때, 본 구조물은 충분한 면진 효과를 나타내고 있다고 할 수 있다.

Table 8과 Table 9의 비교결과, 예비설계식에 의한 결과는 동적해석에 의한 결과보다 긍정적 면진효과, 즉 가속도 저감 및 변위 최소화가 덜 한 것으로 평가되었다.

면진-비면진 구조물간 응답 차이에 있어서는 동일한 특성을 갖는다 할지라도 원전 구조물이 일반 산업계 시설물들 보다 더 큰 응답차이를 보일 수 있는데, 이는 일반적인 원전 구조물 설계에 이용되는 설계 응답스펙트럼[16]이 KBC[3] 등의 일반산업계에서 이용되는 설계응답 스펙트럼보다 단주기영역 대비 장주기 영역 가속도의 감소 비율이 더 크게 나타나기 때문이다.

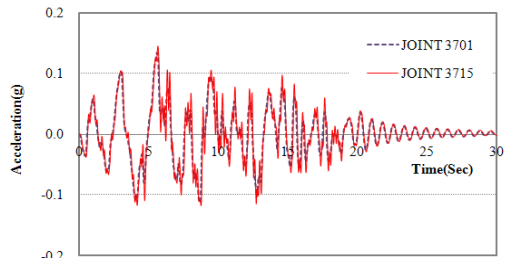


(a) Acceleration Time Histories

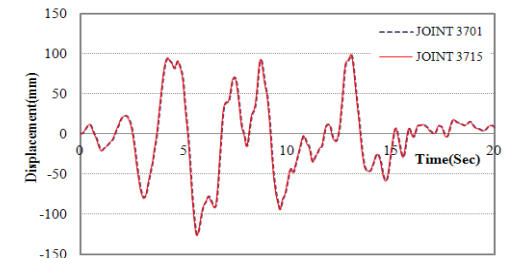


(b) Displacement Time Histories

Fig. 8. Responses of the Non-Isolated Structure under 3 Directional Excitations ($\beta=20\%$)



(a) Acceleration Time Histories



(b) Displacement Time Histories

Fig. 9. Responses of the Seismically Isolated Structure under 3 Directional Excitations ($\beta=20\%$)

5. 동적해석과 예비설계식 결과 비교

5.1 동적해석시 시산수행 유무에 따른 영향 검토

면진받침 설계를 위한 납의 항복변위 산정시 시산 유무에 따른 응답 영향을 검토해보기 위해 시산에 의한 납의 항복변위 차이가 큰 $T=2\text{ sec}$, $\beta=30\%$ 조건에 대해 시산수행과 미수행 경우로 면진받침을 설계하여 x방향 최대응답의 차이를 비교해 보았다.

Table 10. Input Parameters for the Bi-linear Model

	Non-Iteration	Iteration
D (mm)	128	128
K_{eff} (kN/m)	22,516	
D_y (mm)	13	17
Q_d (kN)	1,360	1,568
K_d (kN/m)	11,906	10,284
K_u (kN/m)	119,060	102,840
F_y (kN)	1,515	1,743
K_v (kN/m)	6,414,165	5,540,216

Table 11. Maximum x Directional Responses of Non-Iteration and Iteration Cases

	Max. x Dir. Responses		
	Acc. (g)	Displ. (mm)	Shear Force (kN)
Non-Iteration	0.13	117	2,619
Iteration	0.13	111	2,534

검토결과, x방향 최대응답에 대한 시산 수행 유무의 영향은 Table 11에 서와 같이 가속도, 변위 및 전단력 모두 크지 않은 것으로 나타나 기존의 설 계절차인 $D_y=0$ 가정후 시산과정 없이 남의 면진받침 설계를 수행하여도 결 과산정에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

5.2 예비설계식 적용성 검토

예비설계식에서는 설계응답 스펙트럼을 기반으로 이상화 및 보수성을 둔 가정에 의해 응답 결과가 산정되나, 동적해석에서는 실제 구조물의 자유 도와 비선형성과 같은 현실적인 인자들이 고려된 응답 결과가 산정된다. 기 존의 NEHRP[14] 기준에서는 동적해석 결과값이 예비 설계식의 80~90 % 이상이 되어야 함을 규정하고 있어 예비설계식을 통해 산정된 결과는 동 적해석 결과에 비해 보수적일 수 있음을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 편심의 영향이 적도록 일부 질량점과 강성정보가 수정된 구조물 모델링을 이용하였기 때문에 편심에 의한 추가변위를 고려하지 않 는 예비설계식을 적용 하였는데, 편심에 의한 기초 양끝단 지점(Joint 256 번과 Joint 45번)의 상대 변위 검토결과 Fig. 10에서와 같이 일체 거동에 가 까운 양상을 보이므로 변위 산정시 식(1)을 적용한 것은 타당한 것으로 판 단된다.

다음의 Table 12는 상기절차에 따라 산정된 예비설계식과 동적해석의 변위결과를 나타내며, Table 13은 면진받침 작용 전단력의 비교결과를 나 타낸다. 유효 감쇠비 20% 조건 및 30% 조건에서 예비설계식에 의해 산정 된 변위는 동적해석에 의한 결과보다 약간 보수적이면서도 적절한 수준에 있는 반면, 면진받침 전단력은 동적해석에 의해 산정된 결과보다 조금 낮은 것으로 나타나 받침의 강성편차 및 응답 감소계수를 조금 더 보수적으로 적 용할 필요가 있을 것으로 사료된다. 만일, 면진받침의 강성편차 고려가 적 절하며, NEHRP[14]의 동적해석을 위한 최소 요건 즉, 예비설계값의 80 % 이상 조건을 그대로 적용한다면 응답 감소계수는 1.2 이상이 되어야 하며 설계의 합리성을 고려하여 예비설계값의 90% 이상을 목표로 한다면

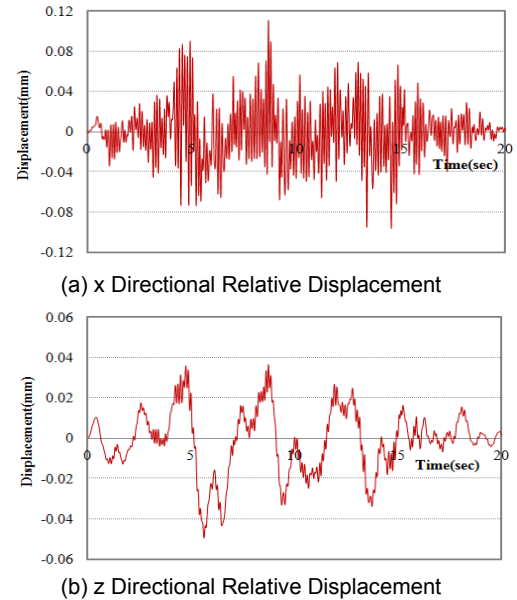


Fig. 10. Relative Displacements Between Joints 256 and 45 ($\beta=20\%$)

Table 12. Comparison of Displacement Results between Design Formula and Dynamic Analysis Cases

Displ. (mm)	Design Formula (①)	Dynamic Analysis(3 Dir.) (②)		②/①
		3715	3701	
$\beta=20\%$	145	127	125	86~88%
$\beta=30\%$	128	111	111	87%

※ Each Number refers to that of Fig. 7(b)

Table 13. Comparison of Shear Forces of Isolators between Design Formula and Dynamic Analysis Cases

Shear Force of an Isolator (kN)	Design Formula (①)	Dynamic Analysis(3 Dir.) (②)		②/①
		177	114	
$\beta=20\%$	2,826	2,942	2,943	104%
$\beta=30\%$	2,502	2,533	2,534	101%

※ Each Number refers to that of Fig. 7(a)

응답 감소계수는 1.3~1.4 정도로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 원자력발전소의 면진설계 기준 개발에 앞서 일반 산업계 와 일부 원전산업계의 면진 설계지침을 준용하여 유효 주기와 유효 감쇠비 변화에 따른 면진구조물 응답 변화양상을 정량적으로 고찰하였고 특정 유효주기 및 유효 감쇠비 범위에서 면진받침을 설계하여 면진효과를 확인 하였으며, 최종적으로 예비설계식과 동적해석결과간의 차이를 분석하여 다 음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일반적인 유효 주기와 유효 감쇠비 범위내에서 면진 시스템 응답은 주 기 변화에 따라 최대 3배까지 차이를 보였으나 감쇠비 변화에는 최대

1.4배 정도의 차이를 보여 일반적인 유효 주기와 유효 감쇠비 범위에서 주기 변화의 영향은 감쇠비 변화에 의한 영향보다 면진시스템의 응답에 2배 이상 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다.

- 2) 기존의 납-고무받침 예비설계시, 초기 가정되는 납의 항복변위는 최종 설계에 이용되는 값과 차이가 있으므로 시산에 의해 두 값이 같아지도록 재산정하여 면진시스템 응답에 대한 시산 수행 유무의 영향을 고찰해 보았다. 그 결과, 시산 수행 유무는 응답결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 기존의 설계절차 적용은 적절한 것으로 판단된다.
- 3) 동적해석에 의한 면진작용 효과 분석을 위해서는 보수적이면서도 합당한 가진 조건의 결정이 선행 되어야 하며, 이를 위해 유효 감쇠비 20% 조건에 대한 입력 지진 조합의 영향을 검토해 보았다. 검토결과, 일방향 가진시 응답결과는 3방향 가진시와 비교할 때 가속도만이 보수적인 것으로 나타났으며, 변위 및 전단력은 오히려 비보수적으로 나타났기 때문에 면진 효과 분석을 위한 가진 조건은 실제와 유사한 세방향 입력 지진운동의 동시 적용이 타당한 것으로 판단되었다.
- 4) 면진시 유효주기가 비면진시와 약 10배정도 차이를 보인 본 연구대상 구조물은 면진 적용시, 약 2배이상의 가속도 감소를 보였고 구조물 내 응답 차이는 최대 14% 이내로 나타났으며 구조물 상하부간 최대 상대변위를 또한 굉장히 낮은 수준으로 나타나 충분한 면진효과를 보이고 있는 것으로 판단되었다. 면진 효과의 관점에서 예비설계식에 의한 결과는 동적해석에 의한 결과보다 긍정적인 면진효과, 즉 가속도 저감 및 변위 최소화는 덜 한 것으로 평가되었다.
- 5) 예비설계식과 동적해석의 직접적인 비교 결과, 예비설계식의 변위 결과는 동적 해석 결과와 비교시 약간 보수적이면서도 유사한 범위에 있었으나 받침 작용 전단력의 경우는 비보수적인 것으로 나타났다. 만일, 면진받침의 강성편차 고려는 적절했으나 응답 감소계수가 비보수적으로 적용된 것이라 가정하면 응답 감소계수는 1.3~1.4 정도가 적절할 것이라 판단된다.

현재, 일반산업계 설계지침에서 제시되는 응답 감소계수는 상부 구조물의 비탄성거동과 관련된 응답수정계수로 부터 산정되나, 이는 상부구조가 기본적으로 탄성을 유지해야 하는 원전의 설계개념과 맞지 않다. 따라서, 원전 적용을 위한 응답 감소계수는 추후 추가적인 해석과 실험결과를 토대 로 응답수정계수와 무관하게 산정되어야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(NO 2011151010010B)입니다.

/ REFERENCES /

1. Hyun-Uk Kim, Dong-Hee Park, "A Parametric Study on Preliminary Design of the Seismic Isolation System for NPP," Proceedings of EESK Conference, Earthquake Engineering Society of Korea, 219-222, 2012.
2. Jong-Hak Kim, Jong-Bo Lee, Sang-Hoon Noh, A Technical Review Report of Seismic Analysis and Enveloped Site Design in Shin-Kori NPP #3&4, Korea Hydro and Nuclear Power, 18-19, 2008.
3. Architectural Institute of Korea, Korea Building Code, 2009
4. Korean Society of Civil Engineers, Korea Bridge Design Code, 997-1006, 2008..
5. American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specifications for Seismic Isolation Design 3rd Edition, 15-16, 2010.
6. American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-10 : Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures Ch.17, Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structures, 165-177, 2010.
7. Bozidar Stojadinovic, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities, US NRC Report, 46-62, 2011.
8. Ronald L. Mayes and Farzad Naeim, The Seismic Design Handbook 2nd Edition Ch. 14 Design of Structures with Seismic Isolation, 2001
9. Gomase O.P., Bakre S.V., "Performance of Non-Linear Elastomeric Base-Isolated Building Structure," J. of Civil & Structural Eng., IPA Vol.2 (1), 280-289, 2011.
10. Japan Electric Association Guide, JEAG 4614-2000 : Technical Guidelines on Seismic Base Isolation Systems for Structural Safety and Design of Nuclear Power Plants, 2000.
11. Japan Nuclear Energy Safety, Regulatory Guideline for Reviewing Seismic Isolation Structure, JNES-SS-1001, 2010.
12. Mokha, A. S., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., "Verification of friction model of Teflon bearings under triaxial load,," Journal of Structural Engineering, 119(1):240-261, 1993.
13. National Institute of Building Science, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures(FEMA 450) Ch.13, Seismically Isolated Structure Design Requirements, 215-232, 2003.
14. National Institute of Building Sciences, NEHRP Recommended Provisions(FEMA 451), 11-1~11-34, 2006.
15. Ryan, K. L., Kelly, J. M and Chopra, A. K., "Nonlinear model for lead-rubber bearings including axial-load effects," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 131, No. 12, 1270-1278, 2005.
16. US NRC, Regulatory Guide 1,60 - Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
17. US NRC, Seismic Design Parameters(Rev 3), NUREG-0800 SRP 3.7.1, 2007.
18. US NRC, Regulatory Guide 1.208 - A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, 2007.