

입력운동 생성방법과 강진지속시간에 따른 면진원전의 거동 분석

Behavior Analysis of a Seismically Isolated NPP Structure by Varying Seismic Input Generation Method and Strong Ground Motion Duration

김현욱^{1)*} · 주광호¹⁾ · 노상훈¹⁾ · 정창균²⁾

Kim, Hyun-Uk^{1)*} · Joo, Kwang-Ho¹⁾ · Noh, Sang-Hoon¹⁾ · Jung, Chang-Gyun²⁾

¹⁾한수원 중앙연구원 플랜트건설기술연구소, ²⁾캘리포니아 주립대학교 데이비스 캠퍼스

¹⁾Plant Construction & Engineering Office of KHNP Central Research Institute, ²⁾Univ. of California at Davis

/ A B S T R A C T /

In this paper, firstly, acceleration-time histories were generated by varying strong motion duration in the frequency domain for application to a seismically isolated nuclear power structure, so as to examine the effects of strong motion duration on the behavior of the structure. Secondly, real recorded earthquakes were modified to match the target response spectrum based on the revised SRP 3.7.1(2007) and the modified time histories were applied to the analysis of a seismically isolated nuclear power structure. The obtained values of acceleration and displacement responses of the structure were, finally, compared with the values obtained in case of applying acceleration-time histories generated in the frequency domain to the structure.

Key words: Nuclear Power Structure, Seismically Isolated Structure, Seismic Input Generation, Strong Ground Motion Duration, Non-stationary Characteristic

1. 서론

원전구조물의 지진해석에 이용되는 입력운동은 설계응답 스펙트럼에 부합하고 충분한 에너지를 가질 뿐만 아니라 3방향 지진성분의 통계적 독립성과 같은 실제적인 요소들을 고려하여 결정된다. US NRC SRP 3.7.1 [12,13]과 기타 국외의 내진해석 규정에서는 입력운동 생성과 관련한 다양한 요건들을 제시하고 있으나, 주파수영역에서 가속도 시간이력을 생성하기 위해 필요한 포락함수에 대한 지침은 상세히 제시하지 않고 있다.

2007년 개정된 US NRC SRP 3.7.1[13]에서는 실지진 기록에 근거하지 않은 입력운동의 사용을 불허하고 있는데, 일반적으로 실지진파는 시간에 따라 주파수 성분이 변하는 비정상(Non-Stationary) 특성을 갖고 있으나, 종래에서와 같이 주파수영역에서 가속도 시간이력을 생성할 경우 이러한 비정상 특성을 반영하지 못하게 된다.

본 논문에서는 먼저, 주파수영역에서 다양한 강진지속시간에 따른 가속

도 시간이력을 생성한 다음 면진 원전구조물에 적용하여 입력운동의 강진 지속시간에 따른 영향을 고찰해 보았으며, 다음으로 시간영역에서 목표 응답스펙트럼에 부합하도록 실지진파를 수정하는 스펙트럼 보정 기법을 이용하여 가속도 시간이력을 생성한 다음 이를 면진 원전구조물에 적용하여 가속도 및 변위응답을 산정 하였으며, 최종적으로 강진지속시간을 공통 인자로 한 기존의 주파수영역에서 생성된 가속도 시간이력을 면진 원전구조물에 적용하여 입력운동 생성방법에 따른 거동 차이를 비교/분석해 보았다.

2. 주파수영역에서의 입력운동 생성

응답스펙트럼에 상응하는 가속도 시간이력을 생성하기 위해서는 우선 식(1)을 이용한 초기 가속도 시간이력을 정의하게 된다. 여기서, ω_n 은 각각의 주파수 A_n 은 진폭, ϕ_n 은 위상각 및 $I(t)$ 는 포락함수를 의미한다.

$$\ddot{x}(t) = I(t) \sum_{i=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

*Corresponding author: Kim, Hyun-Uk

E-mail: gomzee@khnp.co.kr

(Received 25 April 2013; Accepted 13 June 2013)

포락함수는 실제 지진의 일시적인(Transient) 특성을 모사하기 위해 정상운동(Steady State Motion)에 곱해지는 함수로 크게 Fig. 1(a)의 사다리꼴(Trapezoidal)과 Fig. 1(b)의 복합형(Compound) 및 지수형(Exponential)으로 나눌 수 있다. 만일 포락함수가 없다면 가속도 시간이력은 시작부터 끝까지 거의 일정한 크기를 갖는 형태를 나타내게 된다. 본 연구에서는 가속도 시간이력 생성에 Fig. 1(b)의 복합형 포락함수를 적용하였으며, 강진지속시간 결정은 사다리꼴 포락함수에 대해 규모별로 제시된 ASCE 4-98[1] 기준을 참고하였다.

ASCE 4-98[1] 및 US NRC SRP 3.7.1[13]에서 제시되는 강진지속시간에 관한 기준 즉, Arias Intensity 5% ~ 75% 도달 소요시간 기준을 적용하면 강진지속시간에 해당하는 영역의 에너지는 전체 영역 에너지의 70%로 간주될 수 있다. 여기에 Jennings 등[3]이 제시한 식(2)와 식(3)을 이용하여 해당구간을 적분하고 에너지 분포비율에 따라 식(6) 및 식(7)과 같이 나누면 복합형(Compound) 포락함수의 추가 파라미터 즉, 상승시간(t_r), 쇠퇴시간(t_d) 및 총 지속시간(T_d)을 Table 1과 같이 결정할 수 있다.

$$I(t) = \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 \quad (0 \leq t \leq t_1) \tag{2}$$

$$I(t) = e^{-c(t-t_2)} \quad (t_2 \leq t \leq t_3) \tag{3}$$

$$c = \frac{2 \ln 10}{t_3 - t_2} \tag{4}$$

$$t_m \times a = 70 \tag{5}$$

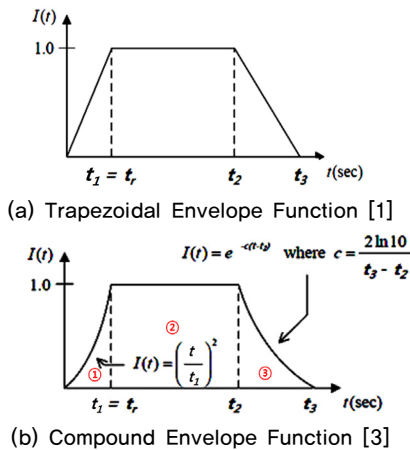


Fig. 1. Envelope Functions used for Time History Generation

$$\left[\int_0^{t_1} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 dt \right] \times a = 5 \tag{6}$$

$$\left[\int_{t_2}^{t_3} e^{-c(t-t_2)} dt \right] \times a = 25 \tag{7}$$

이를 위해서는 우선, 식 (5)와 같은 가상의 계수(a, arbitrary factor) 도입이 필요하다. 여기서, t 는 해당구간 내 임의의 시간을 의미하며, t_m 은 강진 지속시간으로 t_2-t_1 에 의해 산정되고, t_d 는 쇠퇴시간으로 t_3-t_2 로 정해지며, c 는 식(4)에 의해 정의된다. 본 연구에서는 Table 1 Comp. 파라미터에 의해 결정되는 복합형 포락함수와 US NRC의 RG 1.60[14] 설계응답 스펙트럼에 부합하는 ZPA(Zero Period Acceleration) 0.3 g의 가속도 시간이력을 각 지진규모별 30개씩 생성하여 구조해석에 적용하였다.

3. 구조물 및 면진장치 제원 결정

본 연구에 이용된 Fig. 2의 해석모델은 일부 질량점 및 강성정보가 수정된 APR 1400 원전구조물로서 면진장치를 적용한 시스템의 고유주기는 2.0 초로 나타났다. 동적해석은 상용프로그램 SAP2000을 이용하였으며 적용된 면진장치의 형식은 납-고무 면진장치로 비선형 링크요소를 이용하여 Table 2와 같이 이중선형 모델로 이상화하였다. 이는 면진시스템 전체에 대한 이중선형 모델 특성을 바탕으로 면진장치의 총수량(210개)을 고려하여 선형적으로 산정한 값들이다[10].

해석대상 구조물의 경우, 두방향 입력 지진간 상호작용을 배제하고 관심 변수에 의한 영향만을 고찰하기 위해 단일방향으로만 가진하였다. 해석대상 구조물의 모드해석 결과, 1차 모드형상이 Table 3에서와 같이 병진으로 나타났으며, 질량참여율이 가장 높은 방향이 x방향으로 나타났기 때문에 x방향만의 가진에 의해 해석을 수행하였다.

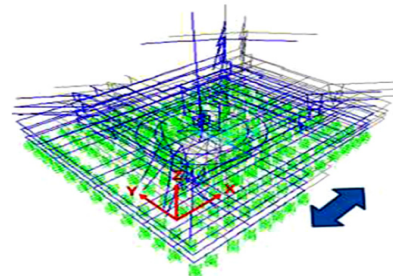


Fig. 2. Analytical Model and 1st Mode of a Seismically Isolated Nuclear Power Structure [10]

Table 1. Strong Motion Duration and Envelope Function Parameters for Each Case

M	t_r (sec)		t_m (sec)		t_d (sec)		T_d (sec)		Number of Data	Δt (ms)	
	Trap.	Comp.	Trap.	Comp.	Trap.	Comp.	Trap.	Comp.		Trap.	Comp.
6.0 ~ 6.5	1	1.5	7		5	11.6	13	20.1	4,096	3.2	4.9
6.5 ~ 7.0	1.5	2.1	10		7	16.6	18.5	28.8		2.3	3.5
7.0 ~ 7.5	2	2.8	13		9	21.6	24	37.4		2.9	4.6

※ Varying Total Duration(T_d) affects the Time Interval(Δt) because of the Limit to the Number of Data(2^n)

Table 2. Input Parameters for the Bi-linear Model of an Isolator [10]

T = 2 sec	$\beta = 20\%$	
K_{eff} (kN/m)	22,516	
D_y (mm)	8	
Q_d (kN)	1,084	
K_d (kN/m)	15,029	
K_u (kN/m)	150,293	
F_y (kN)	1,204	
K_v (kN/m)	8,051,424	

Table 3. Modal Analysis Results of the Seismically Isolated Structure [10]

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

4. 입력운동의 강진지속시간 영향 검토

각 지진규모별 30개씩의 가속도 시간이력을 생성하여 구조해석을 수행하였고, 그 결과 산정된 변위 및 가속도 응답의 평균값에 의거하여 면진 원전구조물에 대한 입력운동의 강진지속시간의 영향을 분석해 보았다.

Table 4. Evaluation of the Effect of the Time Interval on Structural Responses

	No.	Displ. (cm)		Acc. (g)	
		$\Delta t = 3.5$ (ms)	$\Delta t = 7.0$ (ms)	$\Delta t = 3.5$ (ms)	$\Delta t = 7.0$ (ms)
M 6.5-7.0 (10 sec)	1	10.4		0.159	
	2	13.1		0.169	
	3	13.9		0.167	
	4	14.0		0.167	
	5	14.3	14.2	0.169	

Table 5. Comparison of Acceleration and Displacement Responses by Varying Strong Motion Duration

	No.	Displ. (cm)	Acc. (g)	No.	Displ. (cm)	Acc. (g)	No.	Displ. (cm)	Acc. (g)	Min. / Max. (Mean)	
										Displ. (cm)	Acc. (g)
M 6.0-6.5 (7 sec)	1	13.9	0.153	11	11.9	0.144	21	13.7	0.165	9.7 / 14.4 (12.5)	0.129 / 0.165 (0.149)
	2	14.4	0.157	12	12.5	0.148	22	9.7	0.129		
	3	14.4	0.165	13	12.8	0.151	23	9.8	0.131		
	4	12.3	0.139	14	13.2	0.155	24	10.0	0.134		
	5	12.4	0.145	15	13.5	0.158	25	10.2	0.136		
	6	12.0	0.148	16	13.9	0.162	26	10.4	0.136		
	7	11.6	0.146	17	13.8	0.163	27	12.6	0.160		
	8	11.4	0.135	18	13.7	0.164	28	14.3	0.152		
	9	11.2	0.136	19	13.4	0.164	29	12.8	0.143		
	10	11.5	0.141	20	13.7	0.165	30	12.9	0.144		
M 6.5-7.0 (10 sec)	1	10.4	0.159	11	12.2	0.160	21	11.2	0.136	8.5 / 16.6 (12.7)	0.130 / 0.178 (0.154)
	2	13.1	0.169	12	12.3	0.160	22	10.6	0.154		
	3	13.9	0.167	13	12.2	0.160	23	8.5	0.130		
	4	14.0	0.167	14	16.6	0.176	24	10.7	0.141		
	5	14.3	0.169	15	16.5	0.178	25	9.5	0.134		
	6	15.1	0.166	16	11.6	0.135	26	16.5	0.178		
	7	14.5	0.161	17	11.4	0.138	27	12.5	0.139		
	8	13.3	0.157	18	10.6	0.142	28	13.6	0.151		
	9	13.2	0.157	19	11.3	0.139	29	14.5	0.156		
	10	12.1	0.158	20	11.8	0.140	30	11.6	0.135		
M 7.0-7.5 (13 sec)	1	10.3	0.142	11	11.2	0.150	21	10.6	0.144	10.3 / 14.2 (11.5)	0.135 / 0.167 (0.151)
	2	11.7	0.135	12	11.1	0.151	22	10.9	0.145		
	3	13.2	0.159	13	11.1	0.158	23	11.5	0.147		
	4	13.9	0.166	14	11.4	0.161	24	11.5	0.148		
	5	14.2	0.167	15	11.7	0.158	25	11.3	0.152		
	6	11.2	0.147	16	11.7	0.154	26	11.1	0.153		
	7	10.3	0.140	17	11.6	0.150	27	11.1	0.151		
	8	12.8	0.153	18	11.5	0.149	28	11.0	0.151		
	9	12.5	0.155	19	11.4	0.149	29	10.9	0.149		
	10	12.0	0.153	20	11.3	0.148	30	10.7	0.148		

주파수 영역에서 가속도 시간이력 생성시, 데이터 갯수는 2ⁿ개로 제한되기 때문에 데이터 갯수가 동일하다면 각 경우별 총 지속시간의 차이는 가속도 시간이력에서의 시간간격 차이를 유발하게 된다. 이와 같은 시간간격의 차이가 가속도 및 변위응답에 끼칠 수 있는 영향을 분석하기 위해 지진규모 6.5-7.0 경우에 대해 시간 간격 3.5 ms와 7.0 ms로 각각 가속도 시간이력을 생성하여 각 경우에 대한 응답차이를 비교 분석해 보았다. 구조물 최상부 지점에 대한 해석 결과, Table 4에서와 같이 시간간격의 차이는 해석대상 구조물의 변위와 가속도 응답에 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

강진지속시간 변화에 따른 면진 원전구조물에 대한 해석결과는 Fig. 3, Fig. 4 및 Table 5와 같다. 본 가속도 시간이력의 경우, 랜덤위상(Random Phase)으로 작성되어 동일한 지진규모 범위 및 강진지속시간을 갖는 경우들에 있어서도 최대변위와 최대가속도의 발생시점이 서로 다르게 나타났다. 강진지속시간 변화에 따른 경향을 분석해보면, 30 ~ 42%의 강진지속시간 증가에도 불구하고 변위는 2% 증가후 9% 감소, 가속도는 3% 증가후 2% 감소로 변위와 가속도 모두 뚜렷한 증감추이를 보이지 않았다. 랜덤위상으로 작성된 본 가속도 시간이력을 적용할 경우, 강진지속시간의 증가는 다자유도계의 상부구조물 각 절점들에 최대응답을 줄 수 있는 주파수 성분들의 최대 진폭과 면진장치에 최대응답을 줄 수 있는 주파수 성분의 최대진폭이 유사한 시간에 발생할 수 있는 확률을 높이거나 첨두 응답이 동시 발생하는 주파수 성분의 수를 증가시킨다. 극단적으로 각 주파수 성분들의 첨두

응답이 모두 동시에 발생할 경우, 상부구조물-면진 시스템의 응답이 최대치를 보일 수 있음을 의미하는 것이다. 그러나, 모드해석결과 Table.3에서와 같이 면진장치에 의한 거동이 절대적(질량참여율 99.99%)인 것으로 나타나므로 면진장치 이외의 요소가 전체 시스템 거동에 미치는 영향이 미미하여 강진지속시간이 증가한다 할지라도 응답변화는 미미하게 나타난 것으로 판단된다.

강진지속시간의 증가에도 불구하고 변위응답에서 오히려 9%, 가속도 응답에서 2% 감소추이를 보인 지진규모 6.5-7.0과 지진규모 7.0-7.5의 경우, 각 경우별 30개씩 생성된 ZPA 1.0 g 가속도 시간이력의 평균 응답스펙트럼을 산정하여 면진 원전구조물의 고유주기(0.5 Hz) 주변영역에서의 스펙트럼 가속도 값을 비교해 보았다. 그 결과, Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서와 같이 지진규모 6.5-7.0의 경우가 지진규모 6.0-6.5 경우뿐만 아니라 지진규모 7.0-7.5 경우보다도 3 ~ 5% 더 큰 스펙트럼 가속도 값을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 발생가능한 편차를 고려하여 각 경우별로 충분한 수의 가속도 시간이력을 생성한다 할지라도 각 경우별 생성되는 가속도 시간이력의 평균 응답스펙트럼 간에는 차이가 발생할 수 있음을 확인한 것이다. 따라서, Table 5의 강진지속시간별 가속도 및 변위응답에 대한 평균값의 미소한 차이는 강진지속시간에 의한 영향이라기보다는 생성된 입력운동의 랜덤성과 이로 인한 입력운동-목표 스펙트럼간의 미미한 스펙트럼 가속도 차이에 의한 결과로 판단된다. 이는 또한 본 연구에 적용된 시간이력들이 특정

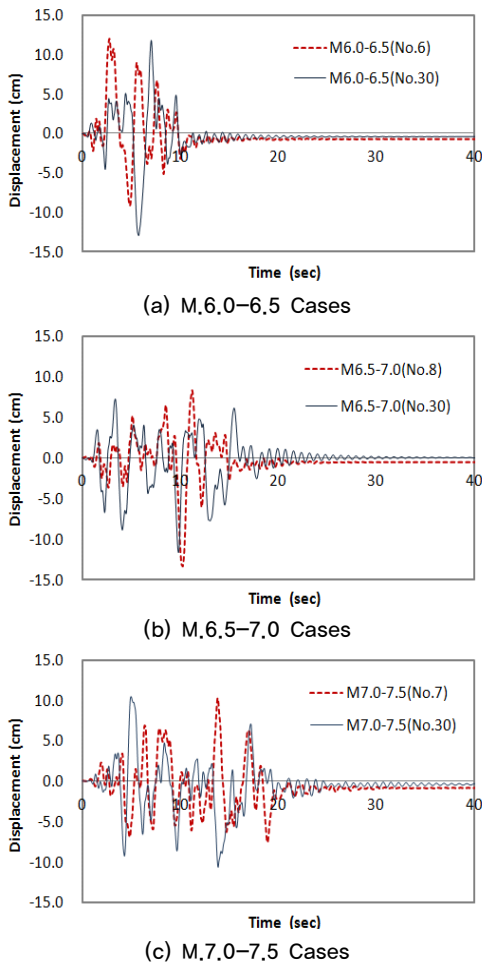


Fig. 3. Comparison of Displacement Time Histories

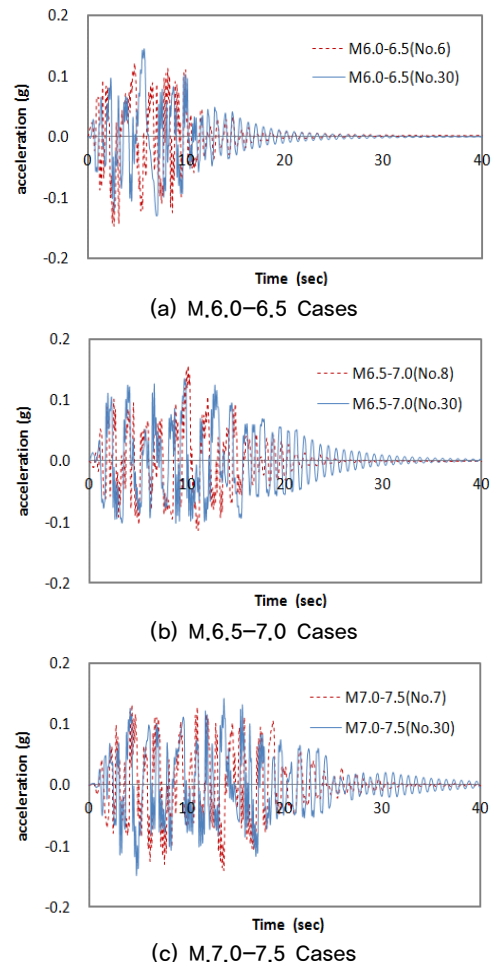
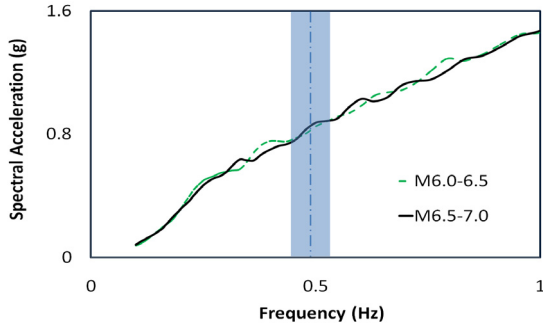
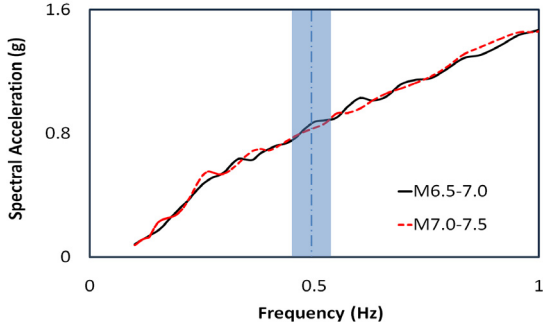


Fig. 4. Comparison of Acceleration Time Histories



(a) Comparison between M.6.0-6.5 & M.6.5-7.0 Cases



(b) Comparison between M.6.5-7.0 & M.7.0-7.5 Cases

Fig. 5. Average Response Spectrum of Each Case using Totally 30 Input Motions (ZPA=1.0 g)

방향으로 치우치거나 누적되는 속도 및 변위를 보이지 않아 결과적으로 구조물에도 특정 방향의 누적변위를 발생시키지 않았다는 점을 고려할 때 타당한 결론이라 사료된다. 따라서, SRP 3.7.1[13] 규정상 최소 강진지속시간 조건을 만족하는 경우, 강진지속시간의 증가는 면진 구조물에 있어서 반드시 보수적인 결과를 초래하지는 않을 것이라 판단된다.

하지만 실제 남-고무 면진장치의 경우, 지속시간이 증가하여 면진 장치의 왕복운동 횟수가 증가하게 되면 Kalpakidis 등[7]의 연구에서와 같이 납심의 온도가 상승하여 감쇠비의 감소가 발생하며, 결과적으로 변위 및 가속도 응답을 증가시킬 수 있으므로 강진지속시간에 대한 영향을 보다 엄밀하게 파악하기 위해서는 추후 지속시간 증가에 따른 납심의 온도 상승효과를 반영할 수 있는 면진장치 모델을 이용한 정밀 해석 수행이 필요할 것으로 판단된다.

5. 입력운동 생성방법에 대한 영향 고찰

5.1 시간영역에서의 입력운동 생성

5.1.1 스펙트럼 보정기법

시간영역에서 가속도 시간이력을 생성하는 방법으로는 Lilhanand &

Tseng[5,6]에 의해 제안된 스펙트럼 보정기법이 있다. 이는 설계응답스펙트럼에 상응하지 않는 실지진 기록에 대한 보정 기법으로 보정된 가속도 시간이력은 실지진 기록과 유사한 비정상 특성을 유지하며, 모든 주파수 범위에서 목표 스펙트럼과 동일한 스펙트럼 가속도를 갖도록 해주는 기법이다. 즉, 임의의 시간(t_i)에서 보정을 위한 시간이력 가속도 $\delta a(t)$ 를 더함에 의해 서생기는 응답스펙트럼의 변화(δR_i)가 설계응답 스펙트럼과 보정대상 시간이력의 응답스펙트럼 차이(ΔR_i)와 같아지도록 하는 것이다. 따라서 본 기법의 핵심은 식 (8)의 $\delta a(t)$ 를 결정짓는 보정함수 즉, wavelet function $f_j(t)$ 에 있다고 할 수 있다. 여기서, $a(t)$ 는 원 가속도 시간이력, γ 는 보정비로 0 ~ 1의 범위를 가지며, b_j 는 보정함수의 크기를 결정짓는 상수, N 은 보정을 위한 응답스펙트럼 요소 개수이다.

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \cdot \delta a(t) \tag{8}$$

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \tag{9}$$

본 연구에서는 적분시 속도와 변위에 있어 Drift를 유발시키지 않는 식 (10)의 Improved Tapered Cosine Wavelet[4]을 이용하였다. 여기서, ω_j 는 해당 주파수, t_j 는 최대응답 발생시간, Δt_j 는 t_j 와 wavelet의 기준 시간축(Reference Origin)과의 차이, γ_j 는 속도와 변위시간이력이 Drift없이 최종적으로 0에 수렴하기 위한 지속시간을 결정하는 주파수 종속 상수를 각각 의미한다.

$$f_j(t) = \cos[\omega_j(t - t_j + \Delta t_j)] \exp\left[-\left(\frac{t - t_j + \Delta t_j}{\gamma_j}\right)^2\right] \tag{10}$$

본 연구에서는 시간영역에서 설계응답스펙트럼에 부합하는 가속도 시간이력의 생성에 RSP Match 09[9]를 이용하였다.

5.1.2 원지진파 보정에 의한 시간이력 생성

본 연구에서는 1999년 대만의 Chi-Chi 지진, 1992년 미국 캘리포니아 주에서 발생된 Cape Mendocino 지진을 대상으로 스펙트럼 보정기법에 의해 US NRC RG 1.60 설계응답스펙트럼에 부합하는 ZPA 0.3 g의 가속도 시간이력을 생성 하였다. 원지진파 및 계측지점의 특성은 Table 6과 같다.

입력운동 생성시 설계응답스펙트럼과 잘 부합하는 가속도 시간이력을 생성하기 위해 보정단계를 15 Pass로 나누었는데, 이때 응답에 있어 큰 변화를 나타내는 0.1 Hz ~ 9.0 Hz 구간을 14 Pass로 특히 세분화 하였다. Fig. 6 ~ Fig. 11은 원지진파 최종 보정된 지진의 가속도 시간이력, 설계응

Table 6. Summary of the Real Earthquake Records to be modified

Name	Year	Station Name / Dir.	M	D (km)	Site Class	V_{S30} (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/sec)
Chi-Chi	1999	TCU072 / N	7.6	7.03	C	468.1	0.40	56.31
Cape Mendocino	1992	CPM / 000	7.0	6.96	C	513.7	1.04	41.26

※ PGA, PGV of Recorded Earthquakes are different with each direction

답스펙트럼, 최종 보정된 지진의 응답스펙트럼, STFT(Short Time Fourier Transform) 결과 및 14번째 Pass와 최종 15번째 Pass의 가속도-속도-변위 시간이력 관계를 나타낸다.

결과에 나타난 바와 같이 모든 대상 지진파는 원 지진파의 비정상 특성을 거의 유사하게 유지하며 설계응답스펙트럼과 매우 잘 부합한다.

식 (10)의 보정함수가 이용되는 경우, 대상 지진파는 주어진 지속시간 내에서 Drift가 없는 즉, 가속도 시간이력 적분시 속도와 변위 시간이력 최종값이 0에 수렴하는 형태를 보이게 되나, 이를 위해서는 Fig. 12의 요건을 충족하는 충분한 지속시간이 필요하게 된다.

Cape Mendocino 지진의 경우, 목표스펙트럼의 최소 주파수를 고려할 때 본래의 가속도 시간이력이 수렴을 위한 최소 시간 간격 요건을 만족하지 못해 Fig. 10(b)에서와 같이 가속도 시간이력 앞부분에 동적 삽입(Dynamic Zero Padding)이 되어 시간 간격이 늘어나게 되었다.

보정 시간이력의 경우, 스펙트럼 보정과정 중 Fig. 8 및 Fig. 11에 나타난 바와 같이 목표 스펙트럼의 큰 장주기 증폭 특성을 부합시키기 위해 원지진

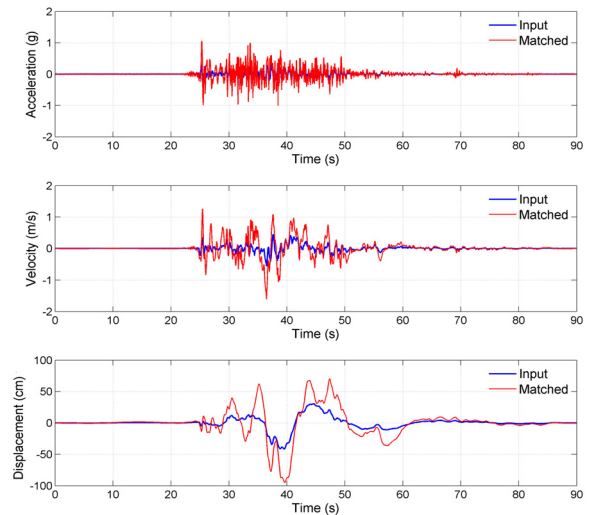


Fig. 8. Acceleration, Velocity and Displacement Time Histories of Modified Chi-Chi Earthquake

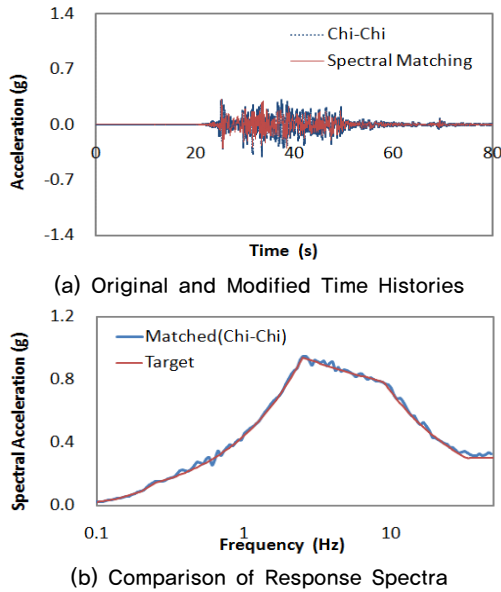


Fig. 6. Spectral Matched Results of Chi-Chi Earthquake

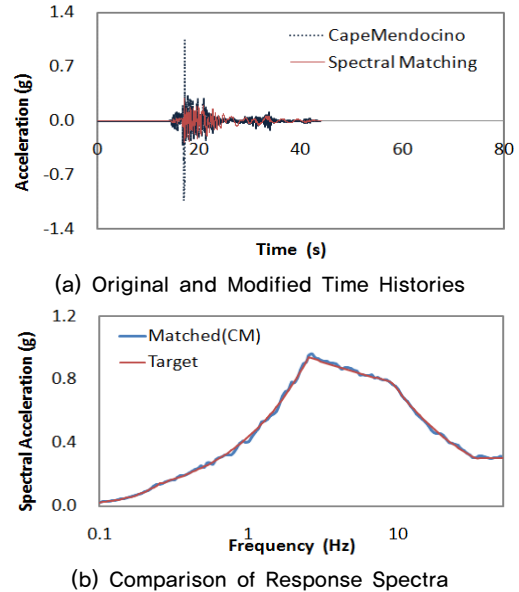


Fig. 9. Spectral Matched Results of Cape Mendocino Earthquake

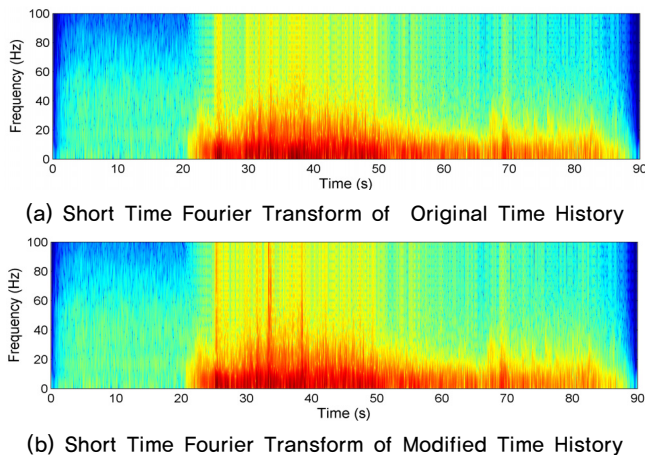


Fig. 7. Comparison of Non-stationary Characteristics between Original and Modified Time Histories - Chi-Chi Earthquake

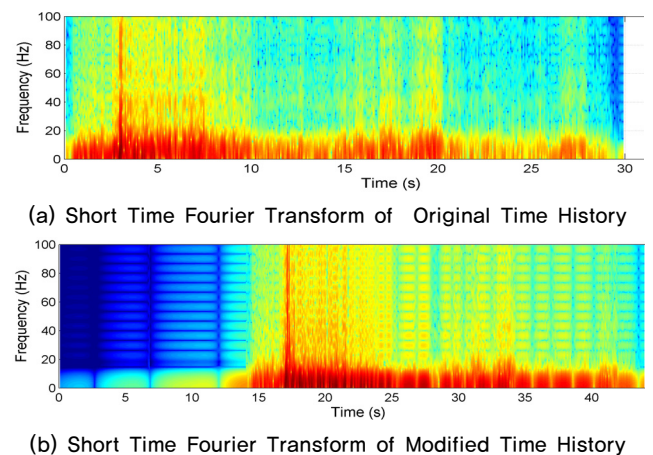


Fig. 10. Comparison of Non-stationary Characteristics between Original and Modified Time Histories - Cape Mendocino Earthquake

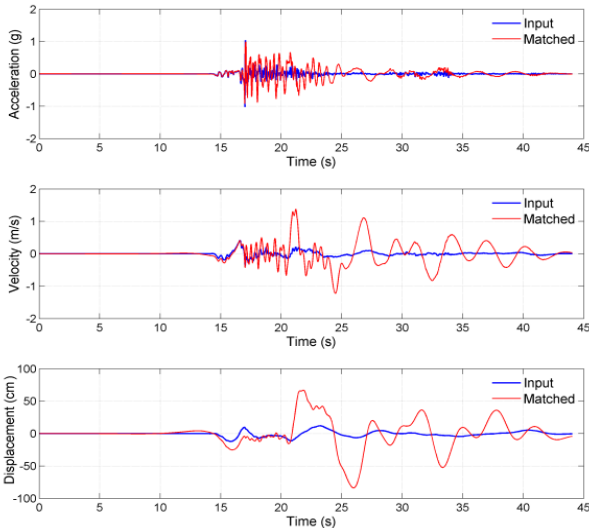


Fig. 11. Acceleration, Velocity and Displacement Time Histories of Modified Cape Mendocino Earthquake

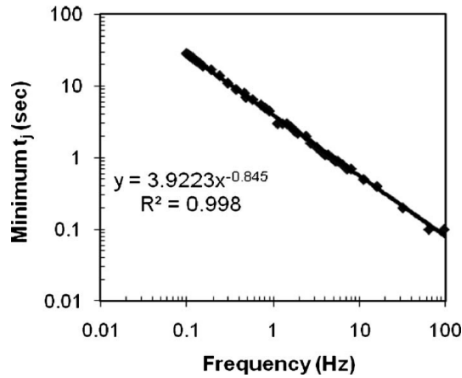


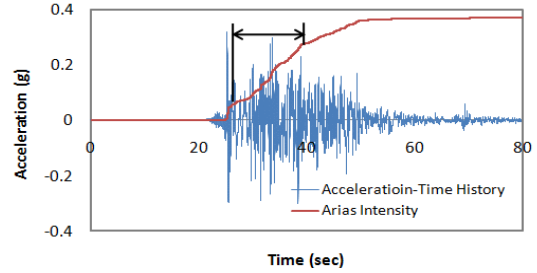
Fig. 12. Relation between Frequency and Required Time [8]

파에 존재하지 않던 장주기 요소들이 많이 포함되므로 이를 면진 구조해석에 이용할 경우, 원 지진파를 해석에 이용하는 경우보다 더 보수적인 응답이 산정될 수 있음을 예상할 수 있다.

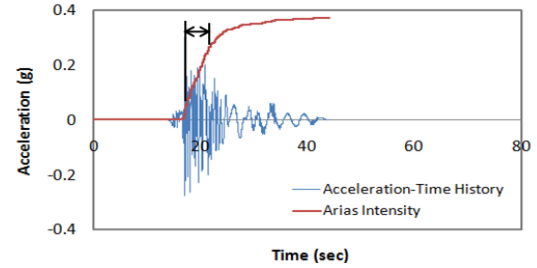
5.2 주파수영역에서의 입력운동 생성

시간영역에서 스펙트럼 보정기법에 의해 생성된 가속도 시간이력과 비교하기 위해 보정된 가속도 시간이력의 강진지속시간을 Fig. 13에서와 같이 Arias Intensity 5%-75% 도달 시간 기준에 의해 결정된 다음, 주파수영역에서의 입력운동 생성시 이와 동일한 강진지속시간을 포락함수의 파라미터로 적용하였다. 즉, 설계응답스펙트럼과 강진지속시간을 시간영역과 주파수영역에서 생성한 가속도 시간이력의 공통인자로 설정하였다.

포락함수는 복합형을 적용하였으며, 포락함수의 기타 파라미터인 상승 시간과 쇠퇴시간은 식(5) ~ 식(7)을 활용하여 에너지 분포 비율에 따라 결정하였다. 주파수영역에서 생성된 가속도 시간이력의 ZPA는 시간영역에서 생성된 가속도 시간이력의 ZPA와 동일한 0.3 g로 하였다. 포락함수의 특성을 요약하면 Table 7과 같다.



(a) A.I of Modified Chi-Chi Earthquake



(b) A.I of Modified Cape Mendocino Earthquake

Fig. 13. Determination of Strong Motion Duration(t_m) based on SRP 3.7.1[13] using A.I(Arias Intensity)

Table 7. Parameters used to determine the Envelope Functions based on Modified Acceleration Time Histories

	t_r (sec)	t_m (sec)	t_d (sec)	T_d (sec)	Number of Data	Δt (ms)
Based on Chi-Chi	3.1	14.4	23.9	41.4	8,192	5.0
Based on CapeMendocino	1.1	5.2	8.6	14.9	4,096	3.6

5.3 입력운동 생성방법의 영향 검토

RG1.60[14] 스펙트럼의 큰 장주기 증폭특성으로 인해 전 주파수영역에서 목표 스펙트럼과 부합하는 결과를 보이는 실지진 기록을 찾기는 쉽지 않다. 본 구조해석에서는 스펙트럼의 전 주파수 영역에 잘 부합하는 2종류의 원지진파를 보정한 가속도 시간이력을 활용하였으며, 이에 대응하도록 주파수 영역에서 동일한 강진지속시간을 갖도록 생성한 10개(각 경우별 5개씩)의 가속도 시간이력을 이용하였다.

면진구조물의 경우, Table.2에서와 같이 대부분의 거동이 면진장치에 의해 좌우되며 면진장치 또한 긴 고유주기를 가지므로 해석에 이용될 보정 지진파는 고주파수 구간까지 목표 스펙트럼을 정확히 부합시킬 필요는 없을 것으로 사료되나, 우선적으로 주파수영역에서 생성되는 입력운동과의 정확한 비교를 위해 고주파수 구간까지 목표 스펙트럼을 만족할 수 있는 2개의 지진파를 활용하였다.

또한 다수의 보정기록을 생성하여 응답의 변동성을 고려하는 대신, 주파수 구간을 세밀하게 15 Pass로 나누어 목표 스펙트럼에 가장 잘 부합하는 단일 시간이력을 산정하여 해석에 적용하는 것으로 하였다.

비선형 시간이력해석 수행시, 가진방향은 강진지속시간 영향 검토와 동일하게 질량 참여율이 가장 큰 X 방향으로만 적용 하였다. 해석결과는 Table 8과 같다.

Table 8. Comparison of the Acceleration and Displacement Responses of the Top Points of the Structure

Time History Generation Method		Analysis Results				Remark
		Displacement (cm)		Acceleration (g)		
Artificial (Freq. Domain)	based on Chi-Chi	11.3*	11.6	0.153*	0.148	*Average Responses of 5 Motions
	based on Cape Mendocino	11.8*		0.143*		
Spectral Matching (Time Domain)	(Modified) Chi-Chi	14.4**	13.9	0.158**	0.154	**A Response using Single Best Fitted Time History
	(Modified) Cape Mendocino	13.3**		0.150**		

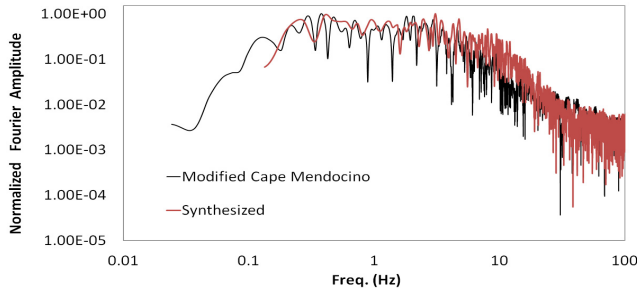


Fig. 14. Fourier Transform of Modified and Synthesized Input Motions - Cape Mendocino Earthquake

주파수영역에서 생성한 가속도 시간이력을 이용한 해석결과, 두 경우별 응답값이 177%의 강진지속시간 차이에도 불구하고 5.8%의 미소한 차이를 보였다. 이는 4절의 검토에서와 마찬가지로 면진장치가 시스템의 거동을 지배하여 면진장치를 제외한 다자유도계 상부 구조물들에 영향을 끼치는 주파수성분들의 첨두 응답 동시 발생빈도 증가 또는 입력운동내 첨두 응답이 동시 발생되는 주파수 성분의 수 증가가 전체 시스템의 거동에 큰 영향을 끼치지 못함에 의한 것으로 판단된다. 시간영역에서 생성된 보정 시간이력을 해석에 이용한 경우, 두 경우별 응답값의 편차는 8.3% 수준으로 177%의 강진지속시간 차이에 비할 때 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 동일한 입력운동 생성방법을 적용하는 경우, 강진지속시간의 증가는 면진장치 내부 온도상승과 같은 실제적인 요소를 고려하지 않을 때, 면진구조의 거동에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다.

입력운동 생성방법에 따른 결과는 실지진 기록을 보정한 가속도 시간이력을 사용한 경우가 변위는 19.8%, 가속도는 4% 더 크게 나타났다. 지반의 변위만을 고려할 때, 보정된 가속도 시간이력내에 설계응답스펙트럼에서 고려하지 못하는 장주기 영역의 주파수 성분이 Fig. 14에서와 같이 잔존하여 실지진 기록을 보정한 경우가 주파수영역에서 생성된 경우에 비해 변위와 가속도 응답이 더 보수적으로 산정될 수 있으나 면진구조의 거동 즉, 면진장치 상하부간 상대변위를 고려한다면 목표 스펙트럼에서 고려하지 못하는 초장주기(0.1 Hz 미만) 영역의 잔존 주파수 성분은 거동에 큰 영향을 끼치지 못할 것으로 판단된다. 시간영역에서 실지진파를 보정하는 방법을 적용하는 경우, 위상각의 랜덤성에 비정상 특성 즉, 시간에 따른 각 주파수 성분의 진폭의 변화(Fig. 7 및 Fig. 10)가 더해져 응답의 예측을 더 랜덤하게 만든다. 다시 말하면, 각 주파수 성분들간 위상차 랜덤성에 의한 상호영향의 랜덤성에 각 주파수 성분들의 시간에 따른 진폭의 랜덤성이 복합적으로 작용하여 주파수영역에서 동일 파라미터에 대해 생성된 입력운동을 사용한 경우와 대소관계 정립이 사실상 불가능해짐을 의미하는 것이다.

따라서 시간영역 보정지진파를 사용한 경우, 가속도 및 변위응답이

주파수영역에서 생성된 지진파를 사용한 경우에 비해 모두 보수적으로 나타난 본 연구와는 달리 주파수영역에서 생성된 지진파 사용시 더 보수적인 응답이 산정될 수도 있으므로 설계에 실지진파를 보정한 지진파를 이용하고자 할 경우, 대상부지 계측지진들을 직접 보정하거나 최대가속도 a , 최대속도 v 및 최대변위 d 에 의해 정의되는 v/a 비 및 ad/v^2 비 등의 파라미터를 이용해 대상부지의 계측기록과 충분히 유사성이 있는 강진지진기록을 엄밀하게 선정 및 보정하여 해석에 이용해야 할 것이다.

본 연구에서는 전 주파수 영역에서 스펙트럼에 부합하는 실지진기록을 찾기가 어려워 한정된 데이터에 의거한 결론을 도출 하였다. 그러나, 주파수영역에서 생성한 입력지진파를 사용한 경우와 마찬가지로 강진지속시간 변화에 따른 거동차이가 낮은 것으로 나타났으며, 이는 다른 모드의 응답이 큰 영향을 끼치지 않고 대부분의 거동이 면진장치에 의해 지배되는 면진구조의 특성인 것으로 판단되기 때문에 전 주파수영역에서 스펙트럼에 부합하는 보정지진파를 사용할 필요성은 낮은 것으로 판단된다. 따라서 추후 연구에서는 목표 스펙트럼과 장주기영역에서 잘 부합하는 보정 지진파 및 강진지속시간과 목표스펙트럼을 공통인자로 하는 인공 지진시간이력을 추가로 생성하여 각 방법별 응답편차 및 상대적인 보수성을 확률론적으로 분석해볼 필요가 있을 것이라 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 먼저, 설계응답스펙트럼에 부합하는 가속도 시간이력을 생성하기 위해 기존 주파수영역에서 랜덤위상을 갖는 가속도 시간이력 생성기법을 이용하여 입력운동을 생성하였고, 강진지속시간에 따른 면진 원전구조물의 거동변화를 고찰하기 위해 복합형 포락함수를 적용하여 30개의 가속도 시간이력을 생성 및 이를 이용한 구조해석을 수행하여 면진 원전에 대한 강진지속시간의 영향을 분석해 보았다. 그 결과, 응답의 보수성은 강진지속시간에 비례하지 않는 것으로 나타났다. 일반적인 구조물의 경우, 강진지속시간의 증가는 허정원 등[15]의 연구에서와 같이 구조물의 응답을 증가시키는 경향을 보이나, 면진구조의 경우 대부분의 거동이 면진장치에 의해 지배되기 때문에 강진지속시간의 증가로 인한 면진장치를 제외한 다자유도계 상부 구조물들의 첨두 응답 동시 발생빈도 또는 입력운동내 첨두 응답이 동시 발생되는 주파수 성분의 수 증가는 전체 시스템의 응답에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

그러나 실제 납-고무 면진장치의 경우, 지속시간 증가에 따른 면진장치의 왕복운동 증가로 납심의 온도가 상승하게 되면 감쇠비 감소가 발생할 수 있으며, 마찰계열 장치의 경우에도 마찰면의 온도가 상승하게 되면 Constantinou 등[2]의 연구에서와 같이 마찰계수 감소로 인한 응답 증가가

예상되므로, 지속시간에 대한 영향을 보다 엄밀하게 파악하기 위해서는 이력거동에 따른 면진장치의 온도 상승효과를 반영할 수 있는 정밀한 모델이 개발/이용되어야 할 것으로 판단된다.

다음으로 설계응답스펙트럼에 부합하며 실지진파의 비정상 특성을 유지하는 스펙트럼 보정기법에 의해 가속도 시간이력을 생성하였고, 생성된 보정 지진파와 동일한 강진지속시간을 갖는 인공지진파를 주파수영역에서 생성하여 각각에 의한 면진 원전구조물의 거동을 비교 분석해 보았다.

동일한 입력운동 생성방법을 적용하는 경우, 강진지속시간의 증가는 구조물 응답에 큰 영향을 끼치지 못함을 확인하였다. 이는 강진지속시간 영향 검토시와 동일한 이유에 의한 것으로 판단된다.

입력운동 생성방법에 따른 결과는 실지진 기록을 보정한 가속도 시간이력을 사용한 경우와 주파수영역에서 생성된 가속도 시간이력을 사용한 경우가 비교적 뚜렷한 차이를 보였다. 본 연구결과에서는 전자의 경우가 후자에 비해 보수적인 응답결과를 보였으나, 전자의 경우는 위상각의 랜덤성에 비정상 특성에 따른 각 주파수 성분의 진폭의 랜덤성(Fig. 7 및 Fig. 10) 이 더해져 응답 예측을 후자보다 더 어렵게 만드는 경향이 있다. 따라서 특정방법의 보수성이 확보되는 것이 아니기 때문에 설계에 실지진파를 보정한 지진파를 이용하고자 할 경우, 실지진기록 선정에 매우 각별한 주의가 요구될 것으로 사료된다.

제한적인 데이터를 활용하였지만, 본 연구를 통해 전 주파수영역에서 스펙트럼에 부합하는 보정지진파를 사용할 필요성은 낮은 것으로 판단되므로 추후 연구에서는 목표 스펙트럼과 장주기영역에서 잘 부합하는 보정 지진파 및 강진지속시간과 목표스펙트럼을 공통인자로 하는 인공 지진시간이력을 추가로 생성하여 각 방법별 응답편차 및 상대적인 보수성을 확률론적으로 분석해볼 필요가 있을 것이라 사료된다.

/ 감사의 글 /

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

/ REFERENCES /

1. ASCE, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary ASCE Standard 4-98. c1999.
2. Constantinou MC, Whittaker AS, Kalpakidis Y, Fenz DM, Warn GP. Performance of seismic isolation hardware under service and

- seismic loading. MCEER Report-07-0012. State University of New York, Buffalo. c2007.
3. Jennings PC, Housner GW, Tsai. Simulated Earthquake Motions. EERL California Institute of Technology, Pasadena, California. c1968.
4. Hancock J, Watson-Lamprey J, NORMAN AA, JULIAN JB, 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(1):67-89.
5. Lilhanand K, Tseng WS. Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping design response spectra. Proceedings of the 9th Structural Mechanics in Reactor Technology K. 1987;2:105-110.
6. Lilhanand K, Tseng WS. Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra, DEVELOPMENT, 1988;3:7-8.
7. Kalpakidis IV, Constantinou MC, Whittaker AS. Modeling strength degradation in lead-rubber bearings under earthquake shaking. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010;39(13): 1533-1549.
8. Al Atik L, Abrahamson N. An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. Earthquake Spectra, 2010 Aug;26(3):601-617.
9. Fouad L, Rathje EM. RSPMatch09. [Internet]. Available from: <http://nees.org/resources/rpsmatch09>. 2012
10. Kim HU. Evaluation of the Applicability of Existing Design Formula for Seismic Isolation to Nuclear Power Plants. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2012 Dec ;16(6):29-36.
11. US NRC. NUREG/CR 6922 P-CARES : Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation of Structures. c2006.
12. US NRC. Seismic Design Parameters, Standard Review Plan 3.7.1. c1996.
13. US NRC. Seismic Design Parameters, Standard Review Plan 3.7.1. c2007.
14. US NRC. Regulatory Guide 1.60 - Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c1973.
15. Huh JW, Jung HS, Kim JM, Hyun CH. Seismic Response Analysis of NPP Containment Structures to Improve the Guidelines of Strong Ground Motion Duration, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2011 Aug ;15(4): 33-43.