

주파수특성이 다른 입력지진에 대한 면진구조물의 지진응답연구 Study on Seismic Responses for Base Isolated Structure Subjected to Earthquakes with Different Frequency Characteristics

유 봉*

Yoo, Bong

이 재 한**

Lee, Jae-Han

ABSTRACT

A study on the seismic responses for a base isolated structure subjected to earthquakes with different frequency characteristics is performed with time history analyses. Two types of seismic inputs are considered in these analyses, one is short period earthquakes such as El Centro(1940,NS), the other is long period ones such as Mexico(1985). The seismic responses of the base isolated structure depend on seismic input types and isolation frequencies. In this study the 0.5 Hz of isolation frequency for short period earthquakes remarkably reduces the acceleration responses, increases the relative displacements of isolator that are still within the proposed limits of isolator. However higher isolation frequency for long period earthquakes is more adequate to reduce the seismic responses of the base isolated structures; in the study 0.75 Hz is effective to Mexico 1985 earthquake.

1. 서론

면진시스템의 적용은 지진 피해가 심한 일본, 미국, 뉴질랜드, 이태리, 프랑스, 러시아 등에서 공공건물, 컴퓨터시설건물과 교량, 철도시설, LNG탱크 등의 산업시설, 문화재 시설, 원자력시설 등에 활용되고 있다[1,2]. 프랑스에서는 이미 원자력 발전소 및 사용후 핵연료 저장수조에 적용한 바 있다[3]. 국내에서는 유일하게 LNG 저장탱크에 면진설계를 적용하고 있고 원자력 시설에는 앞으로 설계될 액체금속로에 적용할 예정으로 있어, 면진베어링 개발과 면진된 원자력발전소의 지진응답에 대한 연구가 있어 왔다[4,5,6]. 1994년 Northridge 지진과 1995년 Kobe 지진시 면진구조물은 지진 가속도 응답이 매우 낮아 전혀 피해가 없었으며 구조적 고유 성능을 제대로 발휘하여 그 성가를 높인 바 있다.

면진구조물은 그림 1에서 보인 바와 같이 하부기초매트, 상부기초매트, 이를 연결시켜주는 면진시스템 및 상부구조물과 내부기기로 구성된다. 면진구조물의 지진응답은 가속도 및 상대변위로 나타나며 이들에 영향을 주는 주요 설계변수는 입력지진의 주파수성분 및 크기,

* 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

** 한국원자력연구소 선임연구원, 정회원

면진구조물이 놓이는 지반강성 및 감쇠계수, 면진베어링의 강성 및 감쇠, 상부구조물의 고유진동수로 들 수 있다.

본 연구에서는 국내 원자력발전소 지진해석모델에 면진시스템을 도입할 경우 주파수특성이 다른 입력지진에 따라 가속도와 변위 응답이 어떻게 나타나는지를 해석하였다. 원자로건물은 선형 집중질량 강성모델로 가정하고 고감쇠 면진베어링의 구조특성을 이용하여 수평면진시스템을 구성하였다[5]. 입력지진으로는 El Centro (1940,NS), Chile, Mexico (1985), Kobe(1995) 지진 및 RG 1.60 표준설계 응답스펙트럼에 상응하는 인공지진 가속도기록을 이용하였다[7]. 최대 지반가속도를 0.3g로 표준화한 각 지진입력에 대해서 면진구조물의 면진주파수를 0.5 Hz와 0.75 Hz의 두 경우에 대해 관심 있는 위치에서의 최대가속도와 면진베어링 상하단의 상대변위를 시간이력해석법을 이용하여 구한 후 입력지진 및 면진주파수가 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 입력지진 분석

본 연구에서 고려하는 El Centro (1940,NS), Chile, Mexico(1985), Kobe(1995) 지진 및 USNRC RG 1.60 표준설계 응답스펙트럼에 대한 수평 가속도 응답 스펙트럼 및 변위 응답 스펙트럼을 0.3g로써 표준화시켜 횡축에는 주파수별로, 왼쪽 종축에는 가속도, 오른쪽 종축에는 변위로 나타내면 그림 2 및 3과 같다.

면진주파수의 결정을 위한 일반적인 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 입력지진의 응답 스펙트럼에서 면진주파수에서의 가속도와 변위가 각각 최대 지반가속도(ZPA)와 면진베어링의 전단변형률 100% 일 때의 전단변위보다 작도록 다음과 같이 설정하고자 한다.

$$a_{fiso} \leq ZPA$$

$$d_{fiso} < \textit{shear displacement at 100\% shear strain of isolator}$$

여기서 a_{fiso} 와 d_{fiso} 는 각각 면진주파수에서의 지반 가속도 크기와 변위 크기를 나타낸다.

단주기특성을 갖는 El Centro(1940,NS) 및 Chile 지진의 경우 면진베어링 전단변형률 100% 일 때의 전단변위 28 cm와 0.3g 입력가속도를 기준으로 할 때 면진주파수가 1 Hz 미만이면 입력지진의 가속도와 변위가 이를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 인공가속도지진의 경우에도 가속도와 전단변위 기준을 동시에 만족하는 면진주파수가 0.5~0.75 Hz 범위에 존재하고 있다.

장주기지진인 멕시코지진에 대해서는 면진주파수가 0.5 Hz인 경우 이 위치에서의 입력지진의 변위는 약 100 cm 이므로 면진베어링의 전단변형률 300% 보다 커서 면진주파수로 정하기에 부적절하며, 면진주파수가 0.75 Hz 이상 1.0 Hz까지는 가속도와 변위가 동시에 줄어들고 1 Hz에서 3 Hz 사이에서는 변위는 줄어들지만 가속도는 다시 커지므로 멕시코지진의 경우 0.75 Hz와 1.0 Hz사이의 면진주파수가 바람직함을 알 수 있다.

3. 면진구조물의 지진응답

3.1 선형해석모델

해석에 사용된 가압경수형 원자로건물의 집중질량 강성모델을 그림 1에 제시하였다. 모델에서 절점번호 1에서 10까지는 원자로 격납용기를 나타내며 11번부터 17번까지는 내부구조물을 나타낸다. 절점번호 18, 7 및 11은 각각 상부기초매트, 플라크레인 지지부 및 원자로용기 수평방향 지지부를 나타낸다. 구조물의 전체 무게는 약 68,000톤이며 구조감쇠비는 5%로 가정하였다. 그림 4는 1/8 규모 축소 면진베어링의 대표적인 시험결과를 나타낸 것이다[6]. 200%이상의 전단변형률에서는 비선형변형률 경화특성을 갖는 것으로 나타났다. 이때 면진베어링의 실험에서 전단변형률 100%일 때의 강성계수를 이용하여 면진구조물의 면진주파수를 0.5 Hz으로 설계하고자 하는 경우 설계 축하중이 320톤인 실제크기의 면진베어링은 211개가 필요하게 된다.

면진장치는 그림 4와 같은 면진시스템의 특성시험 결과로부터 등가강성값 (K_{eq})과 점탄성감쇠값(C_{eq})을 다음과 같이 나타낸다.

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C_{eq} &= \zeta_{eq} \cdot C_c \\ &= 2\zeta_{eq} M_f \omega_n \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 F_{max} 및 F_{min} 은 면진베어링의 최대 및 최소전단력이며 δ_{max} 및 δ_{min} 은 면진베어링의 최대 및 최소전단변위이다. 등가감쇠계수 ζ_{eq} 는 다음과 같다.

$$\zeta_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} \delta_{max}} \quad (3)$$

여기서 ΔW 는 이력감쇠를 나타내는 면진베어링 시험에서 에너지 감쇠량, C_c 는 임계감쇠값, M_f 는 면진구조물의 총 질량, 그리고 ω_n 은 면진주파수를 나타낸다. 면진베어링의 이력감쇠를 나타내기 위해 모든 전단변형률에서 감쇠계수가 일정하다고 가정하여, 등가감쇠비 12%를 식(2)에 대입하여 구한 등가 점탄성감쇠값, C_{eq} 를 모든 선형해석모델에 적용하였다.

3.2 동특성해석

원자로 격납용기와 내부구조물로 이루어진 구조물의 고유치를 해석한 결과 비면진경우 3차까지의 고유진동수가 5.39 Hz, 15.73 Hz 및 16.24 Hz이고, 면진구조물의 경우 면진주파수는 0.5 Hz이고 상부구조물의 고유진동수는 5.94 Hz, 16.17 Hz 및 17.77 Hz으로 계산되었다. 비면진구조와 비교하여 상부구조물의 고유진동수가 약간 증가하는 것은 구조물 하단의

고정경계조건이 면진베어링의 상대적으로 유연한 강성으로 바뀐 결과이다. 표 1은 고유진동수와 각 고유진동수에 해당하는 유효질량 및 모드참여계수를 나타낸다. 면진구조물의 1차 모우드는 상부구조물이 강제운동을 나타내며, 2차는 폴라크레인 등이 부착된 격납건물의 모우드, 3차는 원자로용기 지지부 및 내부구조물의 모우드를 나타낸다. 비면진구조물의 진동모우드에 대한 기여도를 보면 1차 및 2차 모우드가 지배하고 있음을 알 수 있다.

3.3 입력지진 및 면진주파수 영향

선형 등가강성모델에서 단주기특성을 갖는 El Centro 1940(NS) 지진, 장주기 특성을 갖는 Mexico 1985 지진 및 USNRC RG 1.60 표준 설계응답스펙트럼에 상응하는 인공 지진가속도 시간기록을 입력지진으로 이용하여 면진시스템의 면진주파수가 0.5 Hz와 0.75 Hz의 각각 두 경우에 대해서 시간이력해석법을 이용하여 지진응답을 구하여 표 2 및 그림 5,6,7 및 8에 각각 나타냈다.

면진주파수가 0.5 Hz인 경우 El Centro 지진 및 인공지진 시간기록을 입력으로 한 경우 대부분의 주요 안전계통 및 기기 부품의 고유진동수인 3 Hz에서 40 Hz 범위에서는 최대첨두가속도응답이 입력지진의 최대가속도보다 작게 나타나므로 면진시스템이 매우 효율적이다. 면진주파수를 0.75 Hz으로 증가시키는 경우 El Centro 지진 및 인공지진 시간기록에 대한 상부구조물의 가속도응답은 증가되나 상대변위는 줄어들음을 보여준다.

Mexico 지진을 입력으로 한 경우 최대 첨두가속도응답이 입력지진의 최대가속도보다 크게 증폭되어 나타나며 면진베어링의 상대변위도 74 cm로 나타나 El Centro 및 인공지진 시간기록을 입력으로 한 경우의 상대변위보다 더 크게 나타나서 0.5 Hz의 면진 주파수를 갖는 면진시스템은 장주기특성의 지진에 대해서는 비효율적임을 알 수 있다. 면진주파수를 0.75 Hz으로 증가시키는 경우 Mexico 지진에 대한 상부구조물의 가속도 응답은 입력지진보다 더 감소되고 또 상대변위도 21 cm가 되어 면진주파수가 0.5 Hz인 경우에 비해서 더 줄어들어 매우 효과적임을 보였다.

4. 결론

입력지진의 주파수성분, 면진시스템의 면진주파수 및 상부구조물의 고유진동수 특성에 따라 면진구조물의 가속도와 변위응답을 분석하였다. 본 연구에 적용된 원자력건물에 대해 입력지진이 단주기 지진일 경우 면진주파수는 0.5 Hz로, 장주기 지진일 경우는 0.75 Hz로 제안하였다.

선형모델 면진구조물에 대한 시간이력해석을 수행한 결과 El Centro 지진(1940,NS) 및 인공지진 시간기록에 대하여는 면진주파수 0.75 Hz 인 경우가 면진주파수가 0.5 Hz 인 경우보다 상부구조물 지진가속도응답을 약간 증가시키나 상대변위응답은 크게 감소시킨다. 장주기지진인 멕시코(1985, 수평)지진에 대하여는 가속도응답이 입력지진 수준보다 감소되고 상대변위응답도 크게 줄어들었다. 앞으로 면진구조물에 대한 장주기 지진입력의 영향을 평가하기 위해서는 보다

많은 지진자료에 대한 지진응답 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Proceedings of the First International Seminar, "Seismic base isolation for nuclear facilities," August, 1989, San Francisco, Cal., USA, A Post Conference Seminar of The 10th Int'l. Conf. on SMIRT-10, USA.
2. Proceedings of 11th SMIRT Post Conf. Seminar, "Seismic isolation of nuclear and non-nuclear structures," Aug. 26~27, 1991, Nara, Japan.
3. Proceedings of Int'l Post-SMIRT(13th) Conf. Seminar, "Seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibrations of structures," Aug. 21~23, 1995, Santiago Chile.
4. 유 봉, 이재한, 구경희, "액체금속로용 고감쇠 면진베어링의 축소모델 시험결과 분석," KAERI/TR-539/95, 한국원자력연구소, 1995.
5. 유 봉, 이재한, 구경희, "고감쇠 면진베어링에 의해 지지된 면진구조물의 지진응답해석," 한국전산구조공학회 봄 학술발표회, 1994.
6. B.Yoo and J.H. Lee et al, "Effects of high damping rubber bearing on seismic response of superstructure in base isolated system," 13th Int'l. Conf. on SMIRT, Aug. 1995, pp.621~627.
7. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, USNRC Regulatory Guide 1.60, Rev. 1, 1973.

표 1. Horizontal Natural Frequencies of PWR Reference Plant

Mode No	Fixed base			Horizontal isolator with 0.5 Hz		
	Frequency (Hz)	Parti. factor	Effect. Mass (kg)	Frequency (Hz)	Parti. factor	Effect. Mass (kg)
1	5.386	1.470	15.11E06	0.5	1.0106	68.34E6
2	15.73	1.532	14.43E06	5.94	-0.0112	942.0
3	16.24	-0.452	1.926E06	16.17	-0.0001	0.257
4	22.38	0.246	3.370E06	17.77	-0.0012	16.36
5	30.68	-0.391	0.657E06	23.76	-0.0003	3.568

표 2. Horizontal Seismic Responses for Isolated Reactor Building Subjected to Seismic Motions of SSE 0.3g

Isolation Freq.	Location	El Centro (1940,NS)	Chile	ATH (RG 1.60)	Kobe (1995,NS)	Mexico (1985)
0.5 Hz	ZPA at Polar Crane Support (g)	0.114	0.072	0.167	0.089	0.42
	ZPA at Rx Vessel Support (g)	0.113	0.067	0.162	0.084	0.42
	Relative Displ. of LRB (cm)	11.0	5.4	14.9	8.2	74.1
0.75 Hz	ZPA at Polar Crane Support (g)	0.123	0.154	0.200	0.206	0.31
	ZPA at Rx Vessel Support (g)	0.120	0.138	0.189	0.191	0.31
	Relative Displ. of LRB (cm)	5.83	5.52	8.24	8.42	20.82

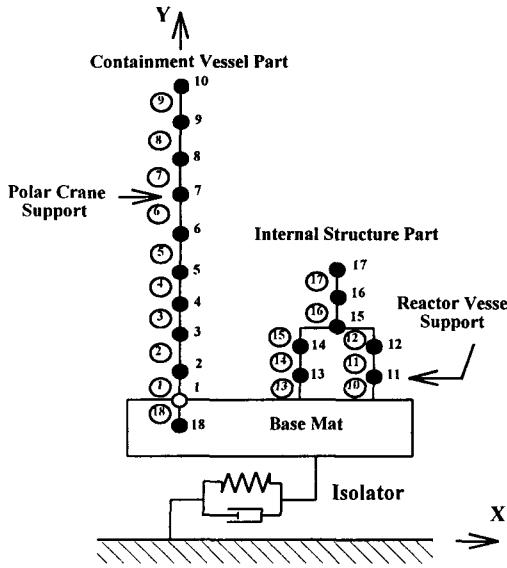


그림 1. Model of PWR Reference Plant

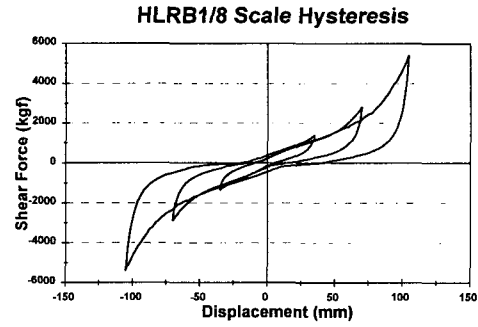


그림 4. Hysteretic Curve of 1/8 Scale HLRB

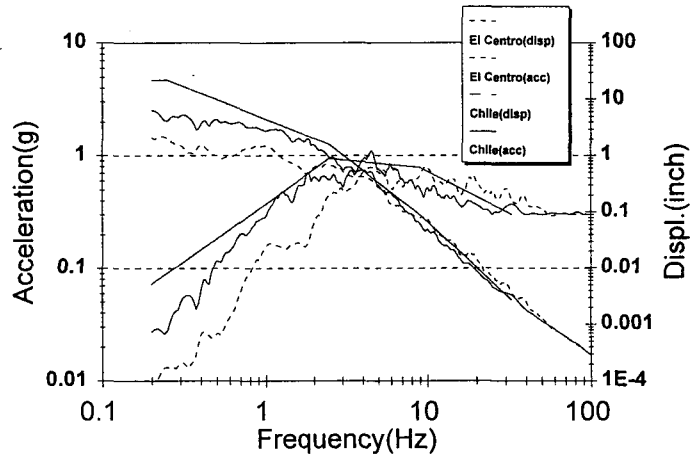


그림 2. Response Spectra of El Centro(1940) and Chile Earthquakes Normalized with 0.3g

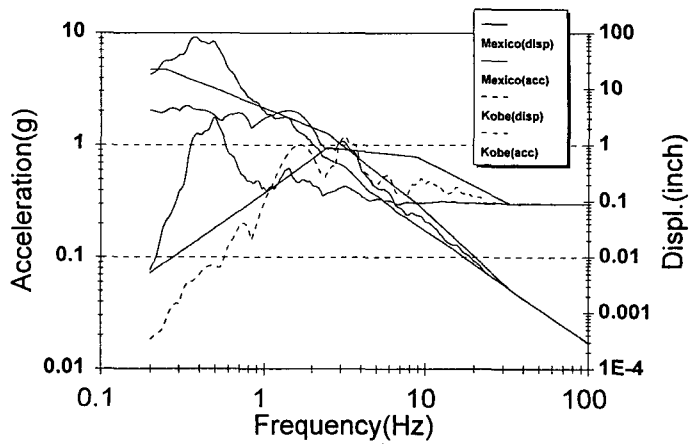
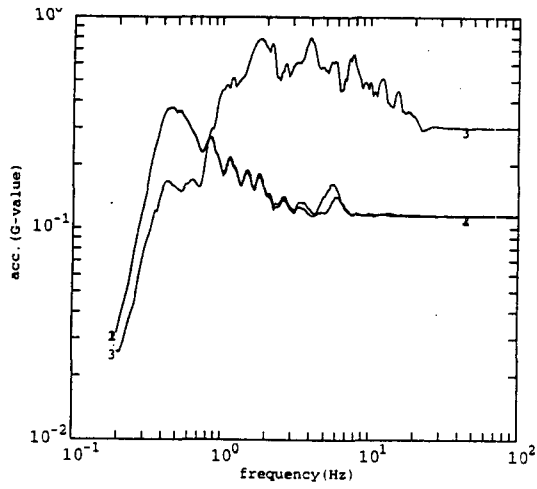
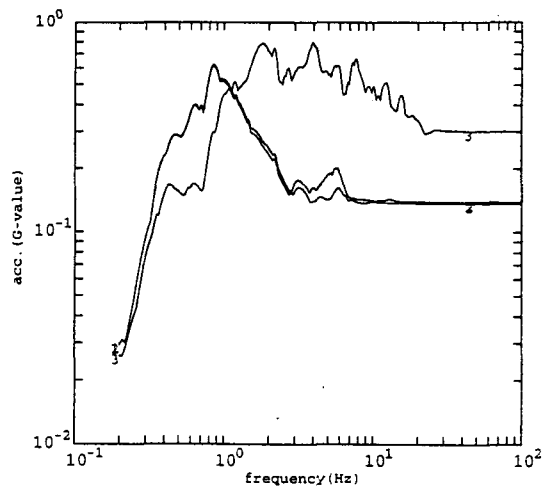


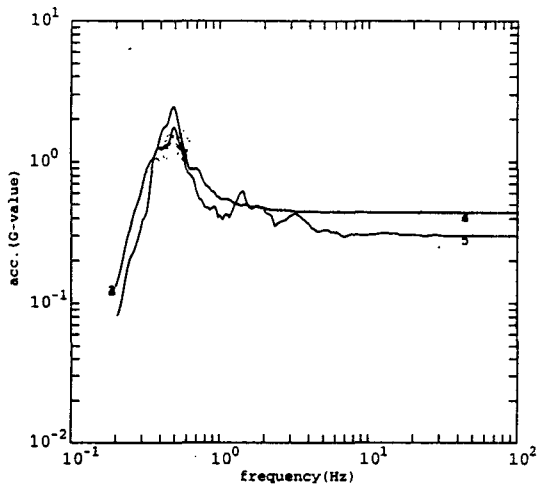
그림 3. Response Spectra of Mexico(1985) and Kobe(1995) Earthquakes Normalized with 0.3g



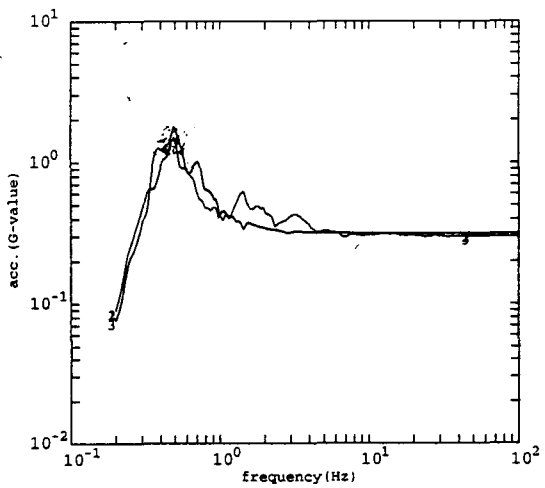
(El Centro 1940(NS) 0.3g Normalized)



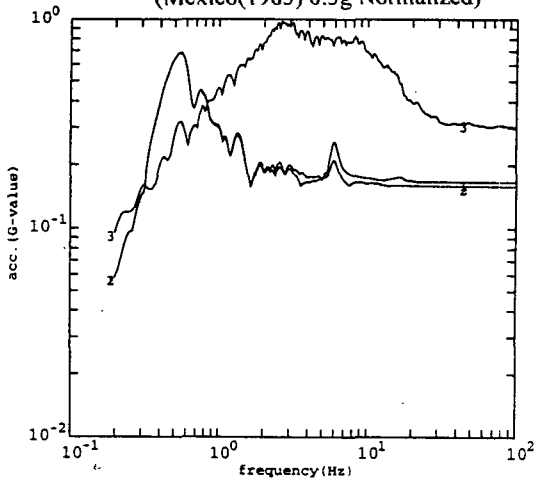
(El Centro 1940(NS) 0.3g Normalized)



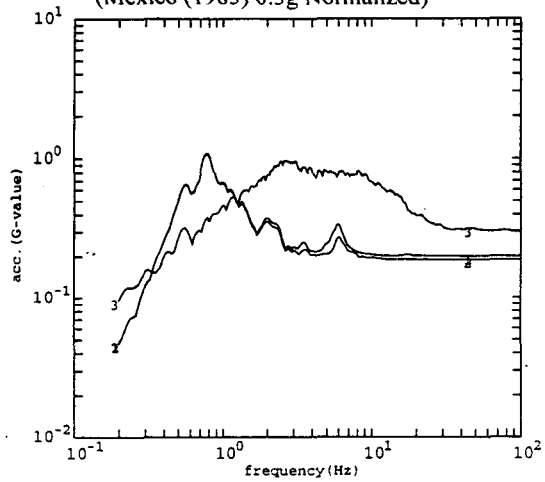
(Mexico (1985) 0.3g Normalized)



(Mexico (1985) 0.3g Normalized)



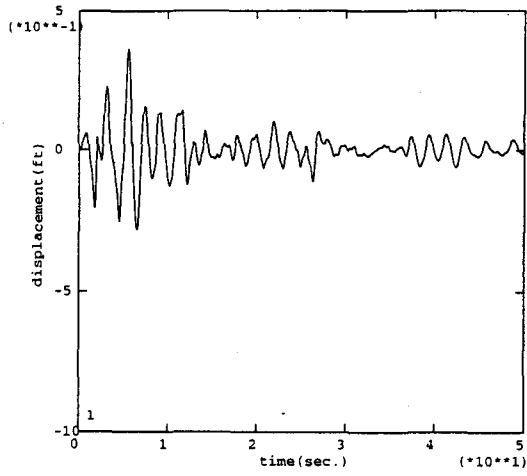
(Artificial Time History(NRC 1.60) 0.3g Normalized)



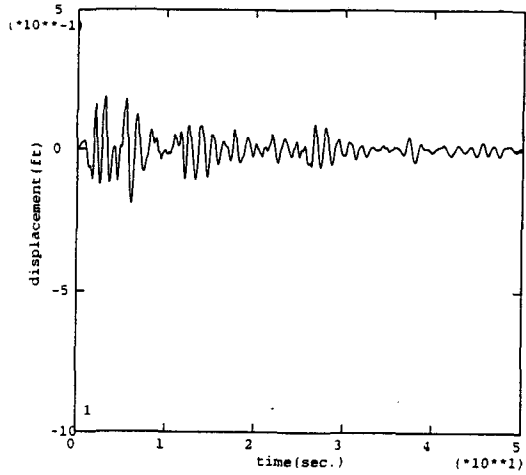
(Artificial Time History(NRC 1.60) 0.3g Normalized)

그림 5. Acceleration Responses with 0.5Hz Isolation

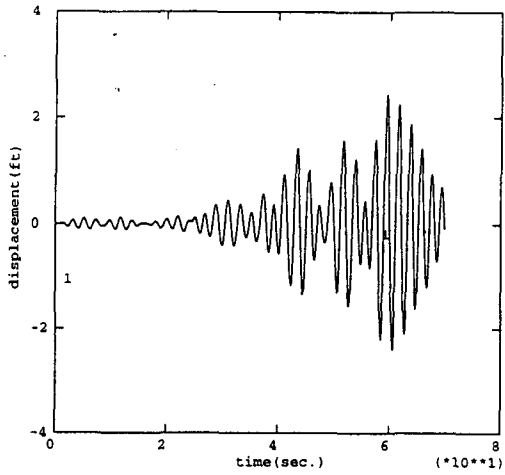
그림 6. Acceleration Responses with 0.75Hz Isolation



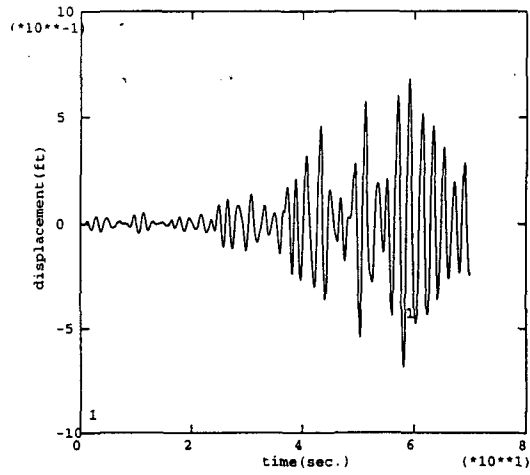
(El Centro 1940(NS) 0.3g Normalized)



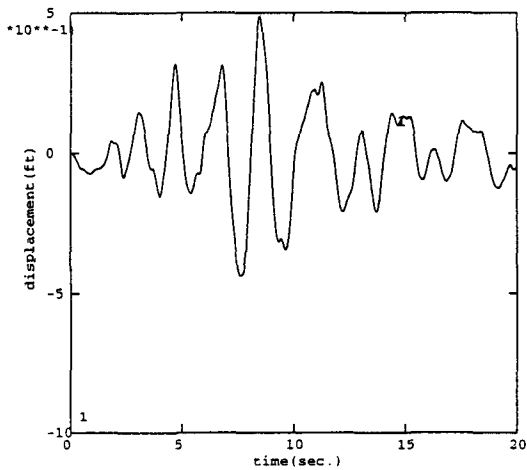
(El Centro 1940(NS) 0.3g Normalized)



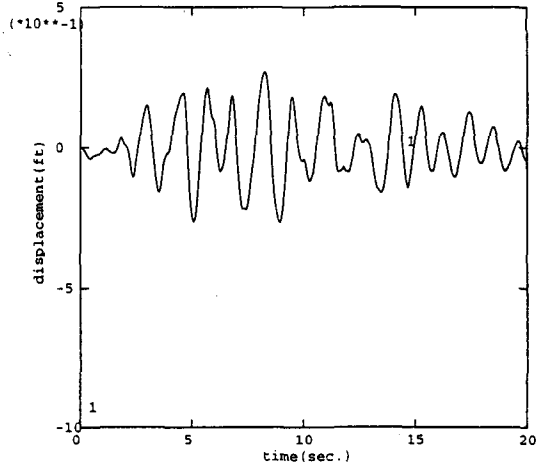
(Mexico(1985) 0.3g Normalized)



(Mexico(1985) 0.3g Normalized)



(Artificial Time History(NRC 1.60) 0.3g Normalized)



(Artificial Time History(NRC 1.60) 0.3g Normalized)

그림 7. Isolator Displacements with 0.5Hz Isolation

그림 8. Isolator Displacements with 0.75Hz Isolation