

선형 2자유도계를 이용한 면진구조물의 지진응답 연구 및
원자력발전소 적용

**Study on Seismic Responses for Base Isolated Structure Using
Linear 2 DOF System and Its Application for NPP**

유 봉*

이 재 한**

Yoo, Bong

Lee, Jae-Han

ABSTRACT

A study of effects of design parameters on the seismic responses of base isolated structure is performed to reduce the seismic responses using a linear two-degree of freedom system and a lumped-mass model of a nuclear power plant(NPP). From the simplified 2 DOF system the optimal isolation frequency being less than 1/10th of the fundamental frequency of superstructure is obtained, and the isolator damping minimizing the peak acceleration depends on superstructure frequency. From the time history analyses for lumped mass model of NPP the optimal damping is calculated as 40% in containment building and 65% in reactor internal structure. Similar results are obtained in 2 DOF system.

1. 서 론

면진구조물의 지진응답 감소를 위하여 지진응답에 가장 큰 영향을 주는 중요 설계변수를 분석하고자 한다. 면진구조물의 지진응답에 관여하는 설계변수로는 입력지진, 면진주파수, 면진베어링의 감쇠비, 상부구조물의 고유진동수 등이다[1,2].

면진구조물의 지진응답을 감소시키는 설계변수를 구하기 위해 실규모 면진구조물을 모형화할 수 있는 선형 2자유도계 면진시스템을 구성하고, 백색잡음 입력에 대한 비면진구조물과의 가속도응답비와 상대변위응답비를 정의하였다. 상부구조물의 고유진동수, 면진모우드에 대한 질량비 및 면진주파수 등의 변화에 따른 가속도와 변위응답을 해석적으로 분석하였다. 또한 이의 적용을 대표적인 가압경수형 원자로건물을 대상으로 하였다. 원자로건물은 집중질량 및

* 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

** 한국원자력연구소 선임연구원

스프링 모델로 가정하고, 고감쇠 면진베어링의 구조특성을 이용하여 수평 면진시스템을 구성하였다. El Centro 1940(NS), Mexico(1985) 및 USNRC RG 1.60 인공지진에 대한 지진응답가속도 및 상대변위를 시간이력 해석법을 이용하여 구하고, 이를 2자유도계 해석결과와 비교분석하였다.

2. 원자로 건물 특성 및 선형 2자유도계 구성

2.1 원자로건물의 모델 및 동특성

해석에 사용된 가압경수형 원자로건물의 집중질량 강성모델을 그림 1에 제시하였다. 모델에서 절점번호 1에서 10까지는 원자로 격납건물을 나타내며 11번부터 17번까지는 내부구조물을 나타낸다. 절점번호 18, 7 및 11은 각각 상부기초매트, 폴라크레인 지지부 및 원자로용기 수평방향 지지부를 나타낸다. 구조물의 전체 무게는 약 68,000톤이며 구조감쇠비는 5%로 가정하였다. 그림 2는 1/8 규모 축소 면진베어링의 대표적인 시험결과를 나타낸 것이다[3]. 면진베어링의 시험에서 전단변형률 100%일 때의 강성계수를 이용하고 면진구조물의 면진주파수를 0.5 Hz로 한다.

원자로 격납용기와 내부구조물로 이루어진 원자로건물의 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. 그림 3은 면진구조물의 수평 모드특성을 5차 모드까지 나타낸 것이며, 표 1은 고유진동수와 각 고유진동수에 해당하는 유효질량 및 모드참여계수를 나타낸다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 면진구조물의 1차 모드는 모드참여계수가 거의 1에 가까워 상부구조물이 강체운동을 하는 것으로 예측되며, 2차 모드는 폴라크레인 등이 부착된 격납용기의 모드, 3차 모드는 원자로용기 지지부 및 내부구조물의 모드를 나타내고 있다.

2.2 선형 2 자유도계 면진시스템

원자로건물 모델을 면진된 경우는 선형 2자유도계로, 비면진된 경우는 선형 1자유도계로 모형화하여 백색잡음 입력에 대해 면진베어링의 감쇠계수, 면진주파수, 상부구조물의 강성변화 등에 대한 응답특성을 연구하고자 한다. 상부구조물과 면진시스템을 그림 4(a)와 같이 2자유도계로 가정하여 상대변위에 대한 운동방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y} + c_1 \dot{y}_1 + k_1 y_1 - c_2 \dot{y}_2 - k_2 y_2 &= -m_1 \ddot{x}_0 \\ m_2 (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) + c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 &= -m_2 \ddot{x}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 m_2 , k_2 및 c_2 는 상부구조물의 질량, 강성계수 및 점탄성감쇠이며 m_1 , k_1 및 c_1 은 상부

기초매트 질량, 면진시스템의 강성계수 및 점탄성감쇠를 각각 나타내며 \ddot{x}_0 는 지반지진가속도를 나타낸다. 여기서 상대변위와 가속도는 다음과 같다.

$$y_1 = x_1 - x_0, \quad y_2 = x_2 - x_1 \quad (2)$$

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_0 + \ddot{y}_1, \quad \ddot{x}_2 = \ddot{x}_1 + \ddot{y}_2 = \ddot{x}_0 + \ddot{y}_1 + \ddot{y}_2 \quad (3)$$

면진시스템을 선형시스템으로 가정하고 다음과 같은 설계변수를 도입한다.

$$\frac{k_1}{m_1} = \omega_1^2, \quad \frac{k_2}{m_2} = \omega_2^2, \quad \frac{m_2}{m_1} = \mu, \quad 2\zeta_1 = \frac{c_1}{\sqrt{k_1 m_1}}, \quad 2\zeta_2 = \frac{c_2}{\sqrt{k_2 m_2}} \quad (4)$$

여기서 ω_1 은 면진주파수, ω_2 는 상부구조물의 고유진동수, μ 는 질량비, ζ_1 및 ζ_2 는 면진시스템의 감쇠계수 및 상부구조물의 감쇠계수를 나타낸다.

지반지진가속도를 단순한 백색잡음 입력(Stationary White Noise Excitation)으로 가정할 때 입력스펙트럼 밀도함수는 $S_x(\omega) = S_0$ 로써 모든 주파수에 대해 상수값으로 나타낼 수 있고 면진시스템의 가속도와 상대변위의 평균자승응답은 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$E[y_1^2] = \pi S_0 \frac{\left[\begin{aligned} &2\zeta_1 \omega_1 \omega_2^2 \left[\mu^2 + \mu(1+\mu)^2 (\omega_2 / \omega_1)^2 \right] \\ &+ 2\zeta_2 \omega_2 \omega_1^2 \left\{ \left[1 - (1+\mu)^2 (\omega_2 / \omega_1)^2 \right]^2 + \mu(1+\mu)^2 (\omega_2 / \omega_1)^2 \right\} \\ &+ 8\zeta_1 \zeta_2^2 \omega_1 \omega_2^2 (1+\mu)^2 \left[1 + (1+\mu)(\omega_2 \omega_1)^2 \right] \\ &+ 8\zeta_2^3 \omega_1^3 (1+\mu)^2 \left[(1+\mu) + (\zeta_1 / \zeta_2)^2 \right] \end{aligned} \right]}{D} \quad (5)$$

$$E[x_2^2] = 2\pi \omega_1^2 \omega_2^2 S_0 \frac{\left[\begin{aligned} &\zeta_1 \omega_1 (\omega_1^2 + \mu \omega_2^2) + \zeta_2 \omega_2 \left[\mu \omega_1^2 + (1+\mu)^2 \omega_2^2 \right] \\ &+ 4 \left\{ \begin{aligned} &\zeta_1^3 \omega_1 \omega_2^2 + \zeta_1^2 \zeta_2 \left[\omega_1^2 \omega_2 + (1+\mu) \omega_2^3 \right] \\ &+ \zeta_1 \zeta_2^2 \left[\omega_1^3 + (1+\mu) \omega_1 \omega_2^2 \right] + \zeta_2^3 (1+\mu) \omega_1^2 \omega_2 \end{aligned} \right\} \\ &+ 16 \zeta_1^2 \zeta_2^2 \omega_1 \omega_2 (\zeta_1 \omega_2 + \zeta_2 \omega_1) \end{aligned} \right]}{D} \quad (6)$$

$$D = 4\omega_1 \omega_2 \left\{ \begin{aligned} &\mu \omega_1 \omega_2 (\zeta_1 \omega_2 + \zeta_2 \omega_1)^2 + \zeta_1 \zeta_2 \left[\omega_1^2 - (1+\mu) \omega_2^2 \right]^2 \\ &+ 4 \zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2 \left[\omega_1 \omega_2 (\zeta_1^2 + (1+\mu) \zeta_2^2) + \zeta_1 \zeta_2 (\omega_1^2 + (1+\mu) \omega_2^2) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

그림 4(b)의 비면진시스템을 나타내는 1자유도계의 백색잡음입력에 대한 상부구조물의 가속도 응답과 상대변위 응답은 다음과 같다.

$$\sigma_x^2 = \frac{\pi S_0 \omega_S}{2 \zeta_S} (1 + 4\zeta_S^2), \quad \sigma_y^2 = \frac{\pi S_0}{2 \zeta_S \omega_S^2} \quad (8)$$

여기서 ω_s 및 ζ_s 는 상부구조물의 고유진동수 및 점탄성 감쇠계수를 나타낸다.

3. 선형 2자유도계를 이용한 면진응답해석

면진 원자로건물의 고유진동수는 격납건물이 5.94 Hz이고 원자로내부구조물이 16.17 Hz 이므로, 2자유도계 면진시스템에서는 상부구조물의 고유진동수가 5 Hz와 15 Hz일 경우의 응답특성을 분석하였다. 이때 면진시스템의 감쇠비는 12%, 상부구조물은 5%이고, 면진구조물 각 부분 모우드의 유효질량을 고려하여 2자유도계의 설계변수들을 $\zeta_1=12\%$, $\zeta_2=5\%$, $f_1=0.5$ Hz, $f_2=5$ Hz 또는 15 Hz, 질량비 $\mu = m_2 / m_1 = 0.001\sim 4.0$ 로 하였다.

3.1 면진주파수 영향

면진시스템의 감쇠비가 12%로 일정하게 주어진 경우 상부구조물의 고유진동수가 각각 5 Hz 및 15 Hz에 대해서 질량비가 0.001, 0.2 및 1인 경우에 면진시스템의 면진주파수를 0.2 ~ 2 Hz까지 변화시킬 때 비면진시스템에 대한 면진시스템의 가속도응답비와 상대변위응답비는 그림 5와 같다. 여기서 면진주파수가 커질수록 가속도응답비는 계속적으로 커지며, 반대로 상대변위 응답비는 계속적으로 줄어든다. 상부구조물의 고유진동수가 5 Hz인 경우가 상부구조물 고유진동수가 15 Hz인 경우보다 가속도 응답비가 크고, 변위응답비는 작은 것을 알 수 있다. 상부구조물 진동모우드의 질량비에 따른 영향을 보면 질량비가 낮을 수록 가속도의 감소폭이 작고, 변위 감소폭은 커지는 것으로 나타났다. 질량비가 0.2인 경우 상부구조물의 고유진동수가 5 Hz 및 15 Hz인 경우 면진주파수가 각각 0.4 Hz 및 1.4 Hz에서 가속도 및 상대변위 응답비를 줄여주고 있다. 이로부터 적절한 면진효과를 위해서는 면진주파수를 상부 구조물의 1차 고유진동수보다 10배 정도 낮게 하면 면진시스템의 응답은 바람직한 것으로 나타났다.

3.2 면진베어링의 감쇠계수 영향

면진시스템의 면진주파수가 0.5 Hz으로 주어진 경우 상부구조물의 고유진동수가 각각 5 Hz와 15 Hz이고, 질량비가 0.001, 0.02, 0.2 및 4인 경우에 면진시스템의 감쇠비를 5% ~ 100%까지 변화시킬 때 비면진시스템에 대한 면진시스템의 가속도응답비를 그림 6에 나타냈다. 그림에서 질량비가 커질수록 가속도응답비를 최소로 하는 면진시스템의 최적감쇠비는 커지며 그 때의 가속도 응답비 값도 더 줄어든다. 하지만 질량비가 4보다 더 크면 가속도응답비는 계속 감소된다. 질량비가 0.2이고 면진주파수가 0.5 Hz인 경우 상부구조물의 고유진동수가 5 Hz에서는 가속도응답비를 최소로하는 감쇠비는 40%이며, 상부구조물의 고유진동수가 15 Hz에서는 최적감쇠비가 55%로 나타났다. 이로부터 최적감쇠비는 상부구조물의 고유진동수가 작은 구조물보다 고유진동수가 큰 구조물에서 더 증가한다.

4. 면진원자로건물의 면진주파수 및 감쇠계수특성

4.1 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 2에 나타냈다. 면진주파수가 0.5 Hz인 경우 El Centro 지진 및 인공지진을 입력으로 한 경우 첨두가속도응답이 입력지진의 최대 가속도보다 크게 감소되어 나타나므로 면진시스템이 효율적이다. 그러나 Mexico 지진을 입력으로 한 경우 최대 첨두가속도응답이 입력지진의 최대가속도보다 증폭되고, 면진베어링의 변위도 크게 나타나 0.5 Hz의 면진주파수를 갖는 면진시스템은 장주기 특성을 갖는 지진에 대해서는 비효율적임을 알 수 있다. 면진주파수를 0.75 Hz으로 증가시킨 경우 El Centro 지진 및 인공지진 시간기록에 대한 상부구조물의 가속도응답은 증가되나 상대변위는 줄어들어 보여준다. 그러나 장주기 특성을 갖는 Mexico 지진에 대한 상부구조물의 가속도 응답은 입력지진 수준으로 감소되고 또 상대변위도 줄어들어 효과적임을 보였다.

4.2 면진시스템의 감쇠계수 영향

선형 등가강성모델에서 El Centro 1940(NS) 지진을 이용하여 면진주파수가 0.5 Hz인 경우 시간이력해석법에 의한 지진응답을 면진시스템의 감쇠계수를 변화에 따라 구하였다. 첨두 가속도응답은 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 면진시스템의 감쇠비 변화에 따라 달라지며, 또한 상부구조물의 고유진동수에 따라 첨두 가속도응답의 최소값이 달라져 상부구조물의 고유진동수가 낮은 플라크레인 지지부에서 면진시스템의 감쇠비가 40%일 때 첨두 가속도응답값이 0.116g가 되며 고유진동수가 큰 원자로용기 지지부에서는 면진시스템의 감쇠비가 65%일 때 0.104g가 되었다. 상부구조물의 고유진동수가 커질수록 첨두 가속도응답이 최소가 되는 면진시스템의 감쇠비도 커지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 상부와 하부 기초매트사이의 상대변위는 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 면진시스템의 감쇠가 증가할수록 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 2 자유도계 면진시스템에서와 유사하며 이를 이용하면 복잡한 구조물의 면진시스템에 대해서도 지진응답특성을 쉽게 예측할 수 있다.

5. 결 론

면진된 가압경수형 원자로건물을 선형 2자유도계로, 비면진시스템을 선형 1자유도계로 모형화 하고, 백색잡음 입력에 대한 면진주파수, 면진베어링의 감쇠비, 상부구조물의 고유진동수 등의 변화에 대한 가속도응답과 상대변위를 구하였다. 이러한 단순해석결과를 발전소 집중질량 모델에 대한 시간이력 해석결과와 비교한 결과 면진베어링의 특성변화에 따른 응답이 잘 일치하였다.

가속도응답을 최소화하는 면진주파수는 견고한 상부구조물의 경우 유인한 상부구조물보다 커지며, 가속도응답을 최소화하는 면진베어링의 감쇠비는 상부구조물의 고유진동수가 낮은 구조물에서 작아진다. 면진모우드에 대한 상부구조물 모우드의 질량비가 커질때 가속도 응답비는 감소하나 변위응답비는 증가한다. 또 시간이력해석에서 입력지진에 대한 영향을 보면 면진주파수는 설계입력지진이 갖는 주파수 특성을 고려하여 결정해야 함을 알 수 있다.

면진시스템의 원자력발전소에 적용은 지진하중을 크게 감소시켜 구조적 안정성을 향상 시킬 수 있는 혁신적인 방법으로 이의 실용화를 위한 지속적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. J.M. Kelly(1986), "Aseismic Base Isolation; Review and Bibliography," Soil Dyn. Earthq. Eng. 5.
2. B.Yoo,et al(1995), "Effects of High Damping Rubber Bearing on Seismic Response of Superstructure in Base Isolated System," 13th Int'l. Conf. on SMIRT, pp.621~627.
3. 유 봉 외(1995), "액체금속로용 고감쇠면진베어링의 축소모델 시험결과 분석," KAERI/TR-539/95, 한국원자력연구소.
4. S.H. Crandall and W.D. Mark(1983), Random Vibration in Mechanical Systems, Academic Press.

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)	Mexico (1985)	ATH(RG 1.60)
0.5 Hz	ZPA at Polar Crane Support (g)	0.114	0.42	0.167
	ZPA at Rx Vessel Support (g)	0.113	0.42	0.162
	Relative Displ. of LRB (cm)	11.0	74.1	14.9
0.75 Hz	ZPA at Polar Crane Support (g)	0.123	0.31	0.200
	ZPA at Rx Vessel Support (g)	0.120	0.31	0.189
	Relative Displ. of LRB (cm)	5.83	20.82	8.24

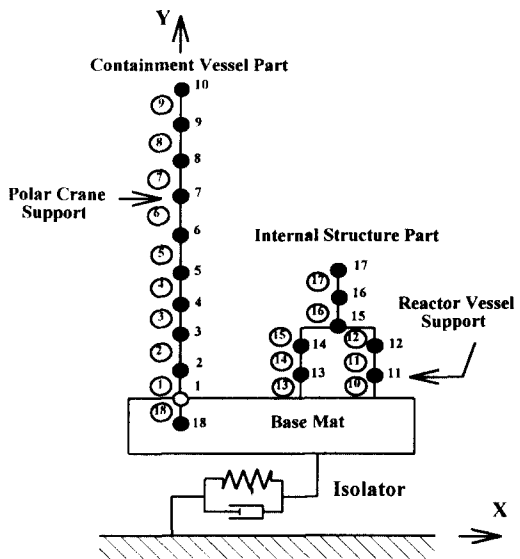


그림 1. Model of PWR Reference Plant

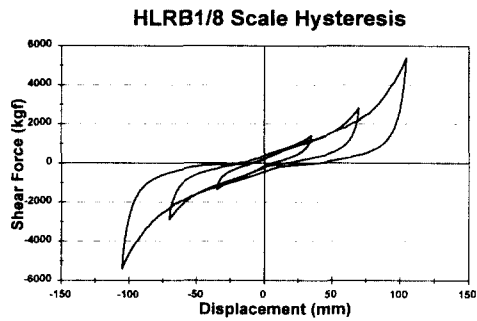


그림 2. Hysteretic Curve of 1/8 Scale HLRB

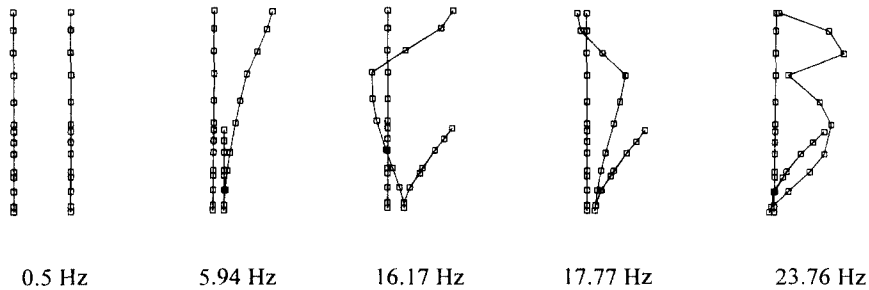


그림 3. Mode Shapes of Superstructure Base-Isolated with 0.5 Hz

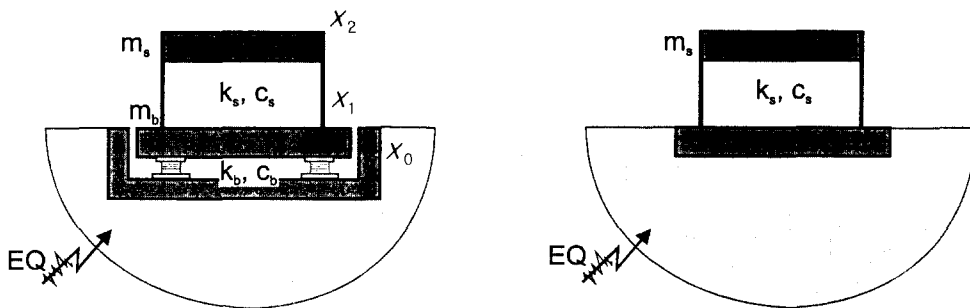


그림 4. (a) Two Degree of Freedom Base Isolation System (b) Single Degree of Freedom Fixed Base System

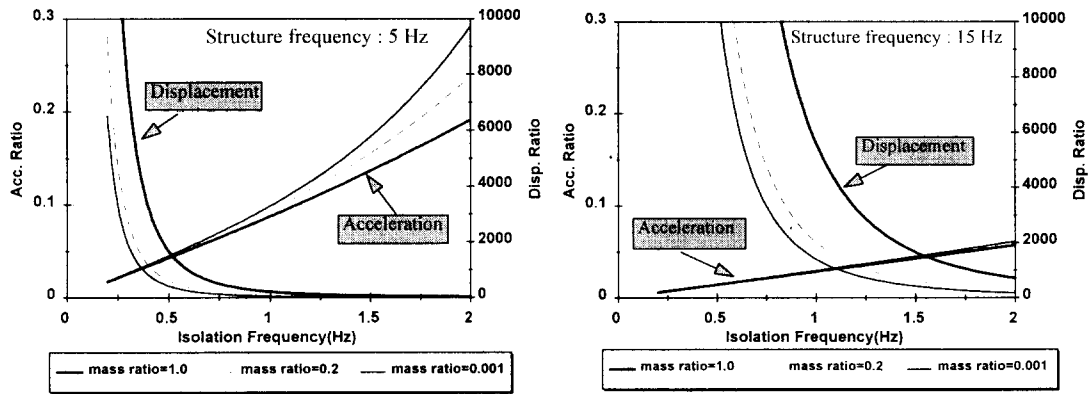


그림 5. 2 DOF Superstructure Responses with Isolation Frequency
(Isolator Viscous Damping: 12%)

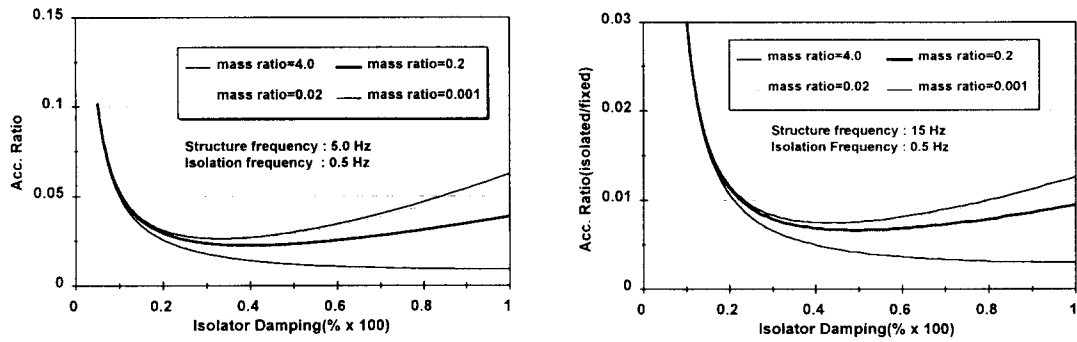
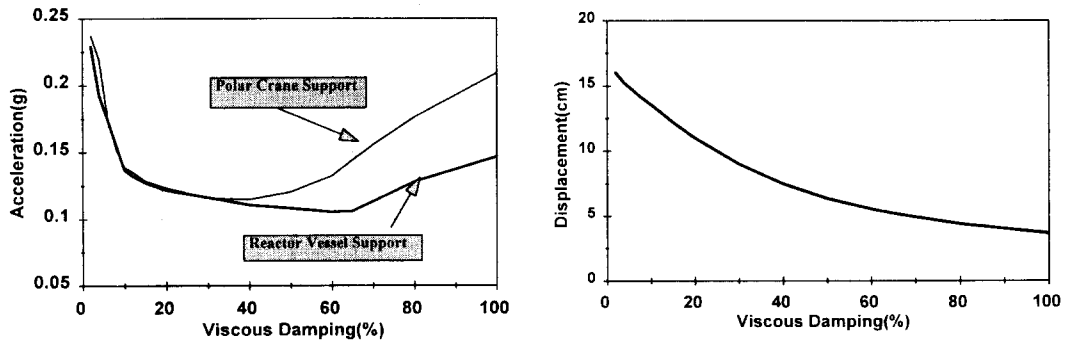


그림 6. 2 DOF Superstructure Responses with Isolator Damping



(a) Peak Acceleration vs. Isolator Damping

(b) Relative Displacement vs. Isolator Damping

그림 7. Time History Analysis Results of NPP Model Subjected to 1940 El Centro Earthquake(NS)