

지진파의 주파수 특성에 따른 면진기기 거동분석

An Experimental Study of the Equipment Isolation Effect as the Input Seismic Motions

김민규, 전영선, 최인길
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 지진파와 구조물에 따른 기기면진효과를 분석하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 이와 같은 분석을 위하여 주파수특성이 다른 세종류의 지진파를 선정하였으며 또한 구조물의 주파수 특성에 따른 거동을 분석하기 위하여 세종류의 모형구조물을 제작하여 실험에 사용하였다. 진동대 실험의 경우 목표로 한 지진파의 모사가 현실적으로 완벽하게 이루어지지 않았으므로 이러한 지진파의 주파수 특성의 차이에 따른 면진기기의 거동을 분석하였다. 기기면진을 위한 면진장치로는 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System: FPS), 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB) 그리고 고감쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였다.

주요어 : 진동대 실험, 주파수 특성, 마찰진자형 베어링(FPS), 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무 베어링(HDRB)

ABSTRACT

In this study, the shaking table tests are performed for the analysis of the equipment isolation effects associated with the input seismic waves and the structural characteristics. For the purpose of this study, the seismic waves which frequency contents are much different were selected. The three kinds of structures which natural frequencies are different are designed and constructed for the shaking table test. The Friction Pendulum System (FPS), natural rubber bearing (NRB) and high damping rubber bearing (HDRB) were selected for the isolation. Finally, the equipment isolation effect as the frequency contents of input seismic waves and the structure types are determined

Key word : shaking table test, frequency contents, Friction Pendulum System (FPS), Natural Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB)

1. 서론

원자력 발전소와 그에 관계된 구조물들은 어떤 외부적인 충격이나 사건에 의해서도 치명적인 손상을 입어서는 안되는 구조물이다. 때문에 발생빈도가 낮지만 발생하였을 경우 큰 에너지를 가지고 있으므로 막대한 피해를 야기할 수 있는 지진으로부터의 대비는 필수적인 일이다. 원전구조물의 내진안전성을 향상시키기 위한 방법으로는 여러 가지 방법들이 연구되고 실제로 적용되고 있으나 본 연구에서는 기기면진을 통한 원전의 안전성을 향상시키는 방법에 대한 연구의 일부로서 실제 구조물 내부의 소형기기면진에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

주파수 특성이 다른 세종류의 구조물을 제작이 용이한 철골구조로 제작하여 실험에 사용하였으며, 면진장치에 따른 거동특성을 분석하기 위하여 역시 세종류의 면진장치를 선정하여 제작하였다. 입력지진의 PGA를 구조물과 지진파에 따라서 0.05g, 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g로 변환하여 PGA에 따른 구조물 및 면진 기기의 거동을 분석하였다. 진동대 실험시 목표로 설정한 지진파를 실험에 사용한 진동대가 정확하게 표현하는 것은 실제로 불가능하므로 실험의 경우마다 매번 다른 형태의 입력지진이 사용되는 것이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 지진파에 의해서 민감하게 거동하는 면진기기의 움직임을 분석해 봄으로서 지진파와 구조물에 따른 면진효과를 살펴보고자 하였다.

2. 실험의 개요

2.1 실험대상 구조물

본 연구에서는 주파수 특성이 다른 3가지 형태의 구조물을 선택하여 진동대 실험을 수행하였다. 실험대상 3가지 구조물의 모식도는 그림 1에서 나타내고 있는 바와 같다. 우선 격납건물 모형으로는 월성원전 2호기 격납건물을 목표로 설정하였다. 그것은 월성원전이 국내에서 최초로 도입된 중수로형 원전일 뿐만 아니라, 월성원전 인근에 발견된 단층의 활성단층 여부가 학계에 초미의 관심사로 대두되고 있는 실정이기 때문이다. 월성원전 격납건물에 대한 수치해석 결과를 검토해 본 결과 고유주파수가 4Hz 부근에서 발생하므로[1] 그와 유사한 고유주파수를 갖는 구조물을 설계 제작하였다(그림 1(b)). 다음으로 원전내 부속건물을 대상으로 목표진동수 7Hz 정도의 2층 구조물을 설계 제작하였다(그림 1(c)). 마지막으로 원전에는 존재하지 않지만 일반 고층건물의 주파수인 1Hz 미만인 구조물에서의 면진효과를 살펴보기 위하여 제원을 달리하여 6층 구조물을 설계 제작하였다(그림 1(a)). 모든 구조물에서 그림에서 나타낸 바와 같이 기기를 모사하기 위하여 중량 400Kg의 강체를 면진시킨후 설치하여 기기를 대신하도록 하였다. 각 구조물의 제원은 표 1에 정리한 바와 같다. 실제 실험에 사용한 구조물의 사진은 그림 2에서 제시하였다.

표 1. 실험 모형의 제원

Member		Specification	Dimension(cm)
Column	2&4 Story	Steel Pipe	OD : 4.27, t :0.36
	6 Story	Steel Pipe	OD : 2.67, t :0.287
Slab		Steel Plate	200x120x4
Slab-Column Connection		High Tension Bolt at End Plate	

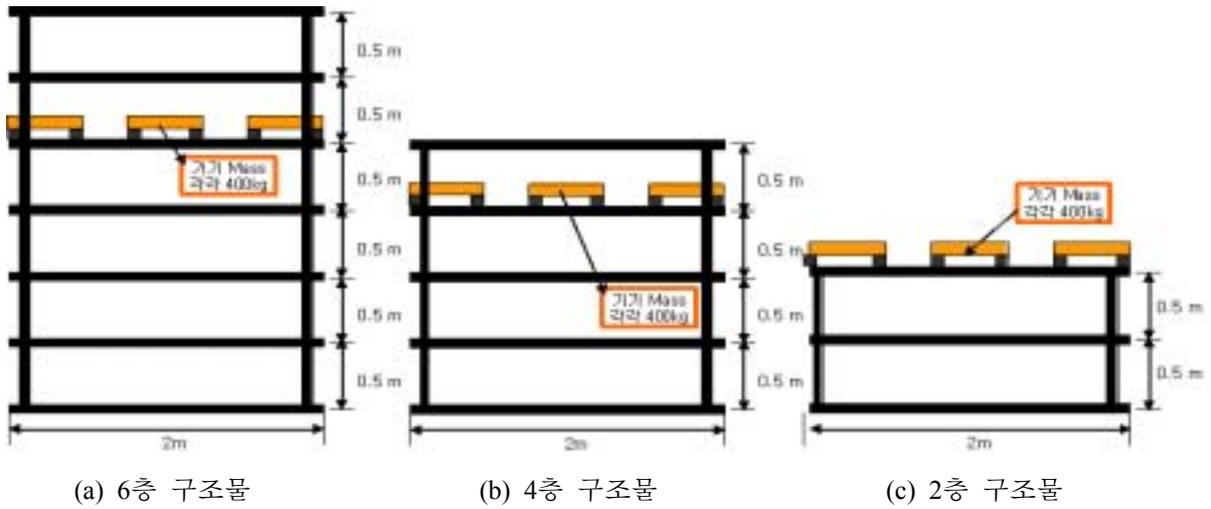


그림 1. 기기면진 실험을 위한 구조물 모식도



그림 2. 기기면진 실험을 위한 구조물 사진

2.2 랜덤진동에 의한 Modal 실험결과

진동대실험의 중간에 랜덤진동을 이용한 Modal 실험을 수행하였다. 자유진동을 이용한 실험을 수행하는 이유는 실험의 중간에 구조물 전체의 고유진동수를 평가함으로써 시스템의 손상 또는 변형 여부를 알아보고자 하였기 때문이다. 자유진동실험은 면진기기가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우에 대해서 모두 수행함으로써 기기설치에 따른 시스템의 변화를 살펴보았다. 실험결과는 그림 3에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진기기가 설치되어 있지 않은 경우는 각 구조물별 고유진동수의 특성이 명확히 나타나는 반면 면진기기가 설치되어 있는 경우는 면진기기로 인하여 고차모드가 상당부분 감소되는 것을 알 수 있다. 그림 3(a)를 보면 6층구조물의 경우는 1차, 2차 모드의 경우는 고유주파수에는 차이가 없으나 면진기기가 설치됨에 따라 1

차모드의 기여도가 크게 증가하며 3차모드부터 불분명해 지는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)의 4층 구조물은 면진기기가 설치되었을 때 1차모드를 제외하고는 대부분의 모드가 사라지는 것을 알 수 있으며 특별히 다른 구조물과는 다르게 1차모드의 고유주파수가 면진기기의 설치로 인하여 상당 부분 저주파 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그림 3(c)의 2층구조물은 면진기기의 영향을 가장 적게 받는 것을 알 수 있으나 진폭은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 본 실험의 경우는 구조물 전체의 무게에 비하여 면진기기의 무게의 비율이 상당히 크기 때문에 면진기기에 의하여 구조물 전체의 동적 응답에서 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 각 경우의 1차모드의 진동수를 표 2에 정리하였다.

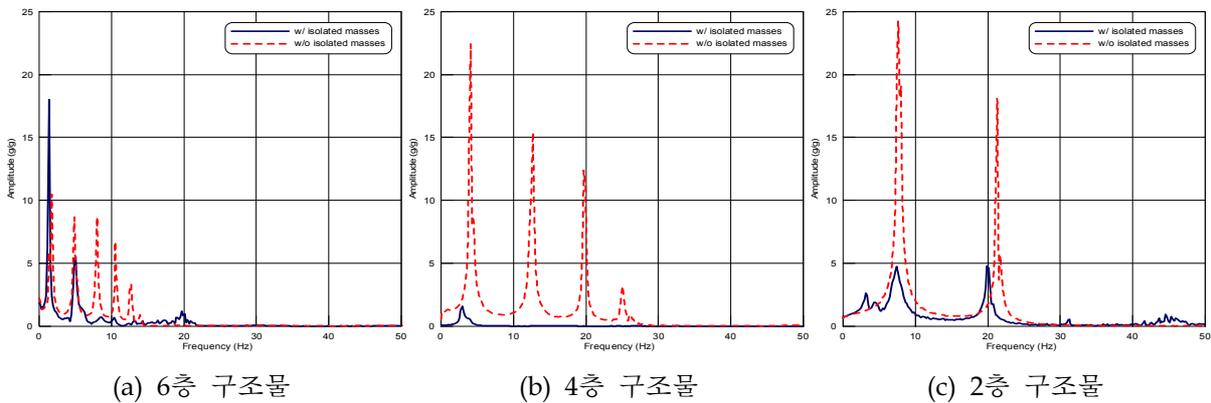


그림 3. 랜덤진동에 의한 실험결과

표 2. 실험대상 구조물의 고유진동수 (단위:Hz)

	6층 구조물	4층 구조물	2층 구조물
기기포함	1.37	2.93	7.42
구조물만	1.76	4.10	7.62

2.2 지진파의 선정

본 실험에서는 3가지의 지진파를 이용하여 실험을 수행하였다. 각 지진기록은 국내의 지반특성을 반영하여 작성된 스펙트럼을 근거로 만들어진 인공지진시간이력(Scenario)[2]과 원전의 설계를 위한 표준응답스펙트럼을 이용하여 생성된 인공지진(NRC)[3], 그리고 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 계측된 지진(TCU052)[4]이다. 각각의 지진은 구조물에 따라서 각각 0.05g, 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 단계로 하여 사용하였으며 0.1g의 경우에 각각의 가속도 시간이력은 그림 2에 제시한 바와 같고 각 지진파의 응답스펙트럼은 그림 3에서 비교하였다.

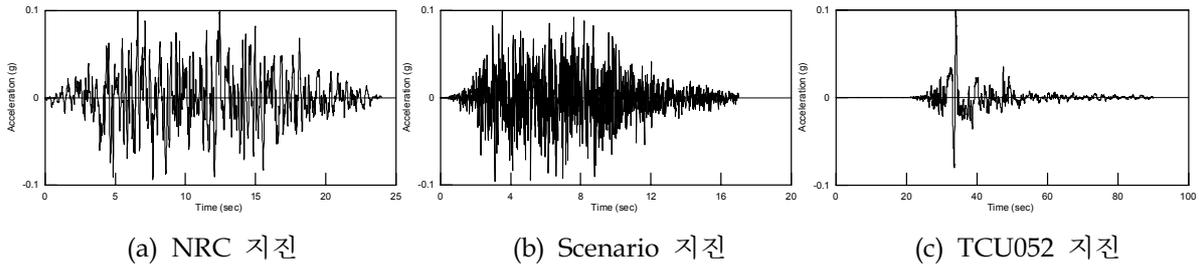


그림 4. 입력지진의 가속도 시간이력

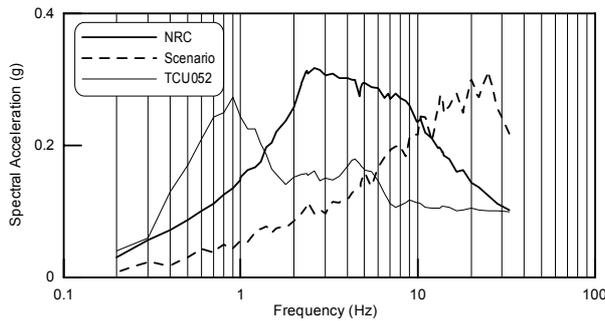


그림 5. 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

2.3 면진장치의 선정 및 설계

본 연구에서는 기기면진을 위하여 3종류의 면진장치를 선정하여 사용하였다. 구조물의 주파수 특성이 다르기 때문에 모든 경우에 만족하는 면진장치를 설계하는 것은 현실적으로 쉽지 않으며, 또한 대상으로 하는 기기의 무게가 매우 작기 때문에 적절한 면진장치를 설계하는 것에 어려움이 있었다. 따라서 4층 구조물에서의 층응답스펙트럼을 산정하여 그것을 기준으로 면진장치를 설계하여 실험에 사용하였다[5].

본 실험에서 사용한 면진장치는 모두 3종류로서 두 종류의 고무베어링과 한 종류의 마찰형 베어링을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 고무베어링은 NRB(Natural Rubber Bearing)와 HDRB(High Damping Rubber Bearing)로서 면진대상 기기의 무게가 매우 작기 때문에 실제로 가장 널리 사용하는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 사용할 수 없었다. 따라서 감쇠력을 높이기 위해서 고감쇠 고무를 사용한 HDRB를 사용하여 그 거동을 살펴보고자 하였다. 천연고무베어링은 2.3Hz의 고유진동수를 가지도록 설계하였으나 고감쇠고무의 경우는 고무의 특성을 정확히 파악할 수 없으므로 NRB와 동일한 형상으로 제작하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. 본 실험에 사용된 고무베어링은 직경 50mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였으며 제작된 모양은 그림 6(a)에서 제시하였다.

또한 본 실험에 사용한 마찰형 면진장치는 FPS(Friction Pendulum System)로서 고유진동수는 1Hz로 결정하였다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에 의하여 FPS의 반경은 24.8cm로, 수평강성은 4.02 kgf/cm^2 로 결정하였다[6].

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

$$K = W/R \quad (2)$$

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률 반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 결정된 값으로 설계한 FPS의 제작된 형상은 그림 6(b)과 같다.



(a) NRB 와 HDRB



(b) FPS

그림 6. 실험에 사용한 면진장치

2.4 실험순서

진동대 실험은 면진기기를 설치하고 있는 구조물별로 각각 PGA를 달리하여 수행하였다. 구조물의 고유진동수 특성 및 지진파의 특성과 관련하여 실험의 순서를 정하였다. 2층 구조물의 경우는 0.1g와 0.2g의 경우에 대한 실험을 수행하였으며, 4층구조물의 경우는 0.1g, 0.2g 그리고 0.25g로 PGA를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 6층구조물의 경우는 구조물의 진동수가 매우 낮고 기둥의 강성을 낮게 정하였으므로 구조물의 안전성을 고려하여 0.05g와 0.1g에 대한 실험을 수행하였다. 실험의 중간단계에 랜덤진동에 의한 Modal 실험을 수행하여 구조물의 이상여부를 판단하고자 하였다. 면진기기가 설치되어 있는 실험과 더불어 기기가 설치되지 않은 구조물만을 대상으로 한 실험을 병행하여 기기설치에 따른 전체 구조물의 거동의 차이를 분석하였다.

3. 입력지진분석

진동대 실험을 위하여 목표지진으로 설정한 지진파와 실제로 진동대를 통해서 입력되는 지진파의 형상은 기계적인 특성으로 인하여 다를 수밖에 없다. 따라서 실험의 매 경우 각 지진파의 주파수 특성을 분석하여 기기응답을 분석하는 것이 타당성 있는 분석이 될 것이다. 먼저 4층 구조물에 대하여 목표로 했던 PGA와 실제 진동대에서 계측된 PGA를 비교하여 표 3에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 전체적으로 Scenario 지진파 NRC 지진의 경우는 목표로 설정한 PGA보다 큰 값의 PGA를 갖는 지진파가 입력된 것을 알 수 있다. 반면 TCU052지진의 경우는 목표지진보다 작은 크기의 지진파가 입력된 것을 알 수 있다. 이것은 TCU052지진의 경우 저주파 성분이 강하며 탁월주파수대가 1Hz 부근이므로 진동대가 모사하기에 어려움이 있었을 것으로 판단된다.

표 3. 4층 구조물에서 목표지진과 실제 입력된 지진의 PGA 비교 (단위:g)

Input	Target	Scenario	TCU052	NRC
1D	0.1	0.133	0.085	0.132
	0.2	0.322	0.158	0.287
	0.25	0.414	0.192	0.331
2D	0.1	0.121	0.084	0.127
	0.2	0.326	0.187	0.272
	0.25	0.399	0.222	0.323
3D	0.1	0.125	0.076	0.134
	0.2	0.311	0.159	0.264
	0.25	0.395	0.208	0.314

입력된 지진파의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 각 입력지진파의 PGA를 1g로 정규화 하여 그림 7에서 그 응답스펙트럼을 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 목표로 하였던 지진파의 응답스펙트럼과 비교해 보면 크게 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 20-30Hz 부근의 고주파 성분이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 따라서 고주파수에서 탁월주파수대역이 형성되어 있는 Scenario 지진의 경우는 비교적 목표지진과 유사하게 진동대가 모사하고 있는 반면 저주파수대역에서 탁월주파수대역이 형성되어 있는 TCU052와 같은 경우는 그 지진파가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 또한 고주파수 영역에서는 경우에 따라서는 목표지진보다 2배 이상 큰 지진력이 입력된 것을 알 수 있다. 국내 원전의 내진설계기준인 NRC 스펙트럼을 이용한 인공지진의 경우는 저주파수 부근에서 목표지진과 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있으며 역시 20Hz 부근에서도 큰 값을 보이는 것을 알 수 있다.

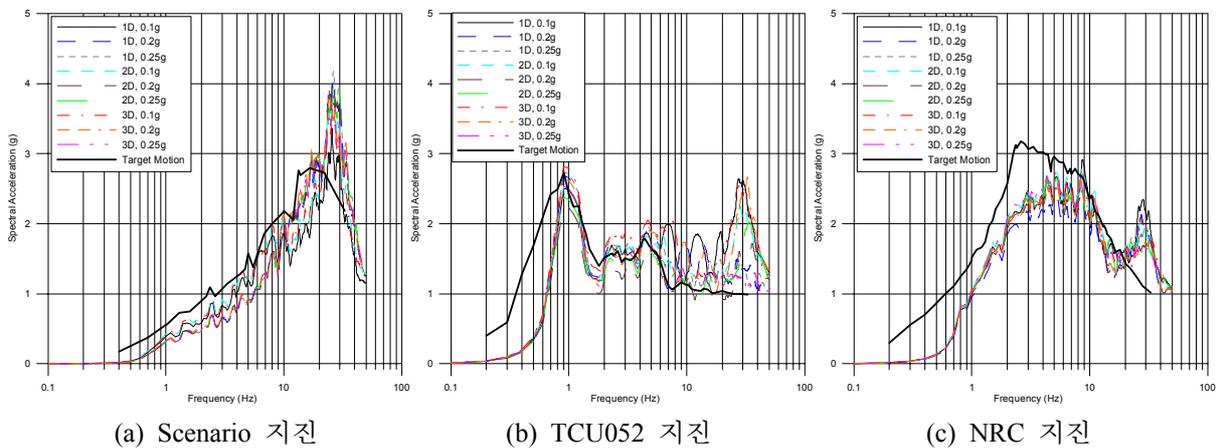
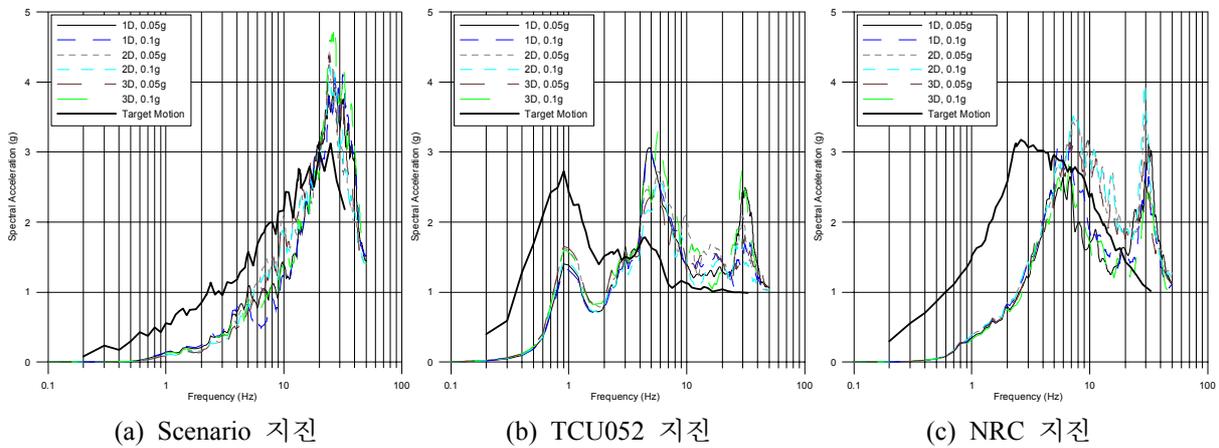


그림 7. 정규화된 입력지진의 응답스펙트럼 (4층 구조)

목표지진의 응답스펙트럼과의 차이를 보이는 것 뿐만 아니라 각 9개의 지진파를 비교한 결과에서도 일정한 지진파가 모사되고 있지 못하며 각각의 지진파가 서로 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. Scenario 지진과 NRC 지진의 경우는 비교적 지진파간의 편차가 적은 것으로 보이나 TCU052 지진의 경우는 동일한 파형을 구현하는 것이 쉽지 않은 것으로 판단된다. 이러한 차이는

실제로는 PGA의 차이를 고려한다면 더 크게 차이가 나는 것임을 알 수 있다. 따라서 동일한 이름의 목표지진을 사용했다고 하더라도 매 실험에 따라 같은 지진파라고 볼 수는 없으며 모든 경우 다른 지진을 사용한 것으로 가정하고 면진기기의 응답을 분석하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

6층 구조물과 2층 구조물의 실험시 입력지진동의 응답스펙트럼을 동일한 방법으로 정규화 하여 그림 8과 그림 9에서 도시하였다. 구조물별로 비교를 하면 6층 구조물의 경우에는 목표지진과 실제 진동대에서 입력지진과의 편차가 매우 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 저진동수 특성이 탁월한 상부구조물의 경우 지진파를 실제로 구현하는 것이 더 어려워지는 것을 알 수 있다. 2층 구조물의 경우에는 모든 구조물중에서 가장 입력지진파를 목표지진과 유사하게 모사하는 것을 알 수 있으며 각 지진파간의 편차도 크지 않을 것을 알 수 있다. 다만 NRC지진의 경우 몇가지 경우에 목표지진과 상이한 지진파를 모사한 것을 알 수 있는데 이러한 경우는 결과분석에서 고려하지 않는 것이 타당할 것으로 판단된다.

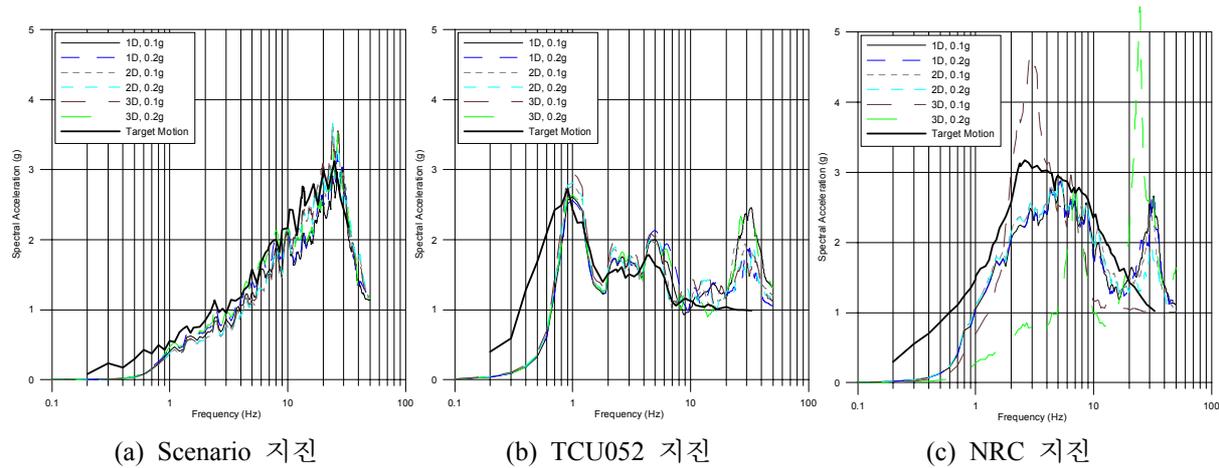


(a) Scenario 지진

(b) TCU052 지진

(c) NRC 지진

그림 8. 정규화된 입력지진의 응답스펙트럼 (6층 구조)



(a) Scenario 지진

(b) TCU052 지진

(c) NRC 지진

그림 9. 정규화된 입력지진의 응답스펙트럼 (2층 구조)

4. 결과분석

4.1 6층 구조물의 응답분석

구조물별로 입력지진파에 따른 기기면진효과를 분석해 보기 위하여 지진응답비를 구해보았다. 즉 6층 구조물의 기기에서 측정된 가속도 응답의 PGA와 5층에서 측정된 가속도 응답의 PGA와의 비를 비교하여 그림 10에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 지진응답비가 균일하게 나타나고있는 것을 알 수 있다. 이것은 실험대상 구조물의 고유진동수가 1.37Hz(표 2)이므로 그림 8의 입력지진파에서 저주파수 영역에서는 균일한 지진입력이 사용되었기 때문인 것으로 판단된다.

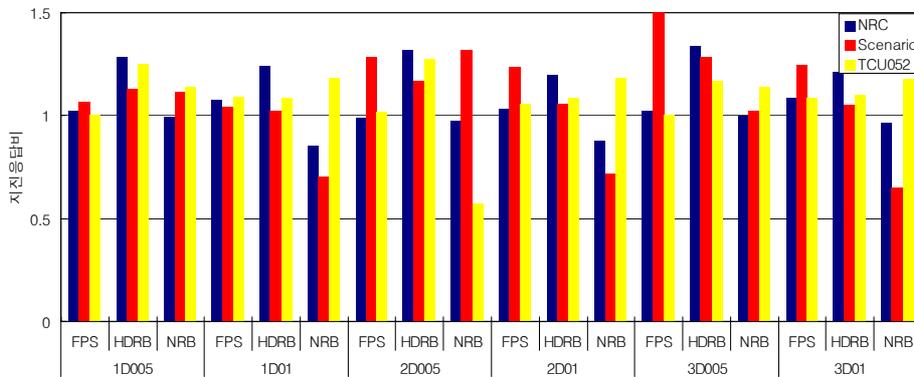
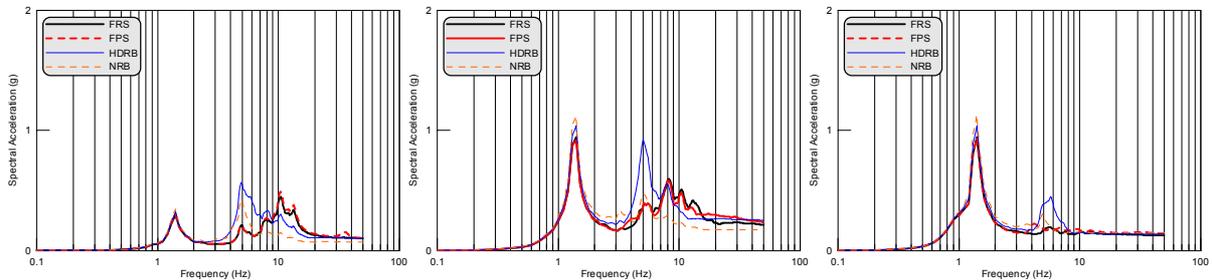


그림 10. 6층 구조물의 지진응답비

면진기기의 응답을 주파수 대역에서 살펴보기 위하여 목표지진이 0.1g이고 1차원 가진인 경우에 층응답과 각 기기에서의 응답스펙트럼을 작성하여 그림 11에서 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 3Hz 미만의 저주파 영역에서는 면진장치에 관계없이 거의 유사한 응답을 보이는 반면 5Hz 부근에서 HDRB의 응답이 증폭되는 것을 알 수 있다. 실험에서 사용한 HDRB의 고유진동수가 3-4Hz이므로 전체 시스템의 2차모드에 해당하는 5Hz에서 증폭을 일으킨 것으로 판단된다. 상대적으로 2.3Hz로 설계한 NRB의 경우는 큰 증폭현상이 발생하고 있지 않은 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진

(b) NRC 지진

(c) TCU052 지진

그림 11. 기기와 층에서의 응답스펙트럼 (6층 구조물, 5층 기기, 목표PGA 0.1g, 1D 실험)

기기에서의 가속도, 속도 시간이력을 비교해 보기 위하여 Scenario 지진시 5층과 각 기기에서의 응답을 그림 12에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진기기의 특성이 나타나지 못하고 층에서의 응답에 지배적인 거동을 하는 것을 볼 수 있다. 즉 전체 구조물의 진동수가 저진동수인 관계로 구조물이 어느정도의 진동후 자유진동하는 것과 같은 거동을 보이고 있는데 FPS의 경우는 거의 층응답과 유사한 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있으며 NRB와 HDRB는 미소하나마 다른 거동을 보이지만 뒤로 갈수록 역시 자유진동하는 것과 유사한 거동을 보이고 있다. 특별히 HDRB의 경우는 5Hz 부근에서의 증폭 영향으로 NRB에 비하여 조금 큰 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 구조시스템과 HDRB간의 공진이 발생한 것에 기인한 것으로 판단된다.

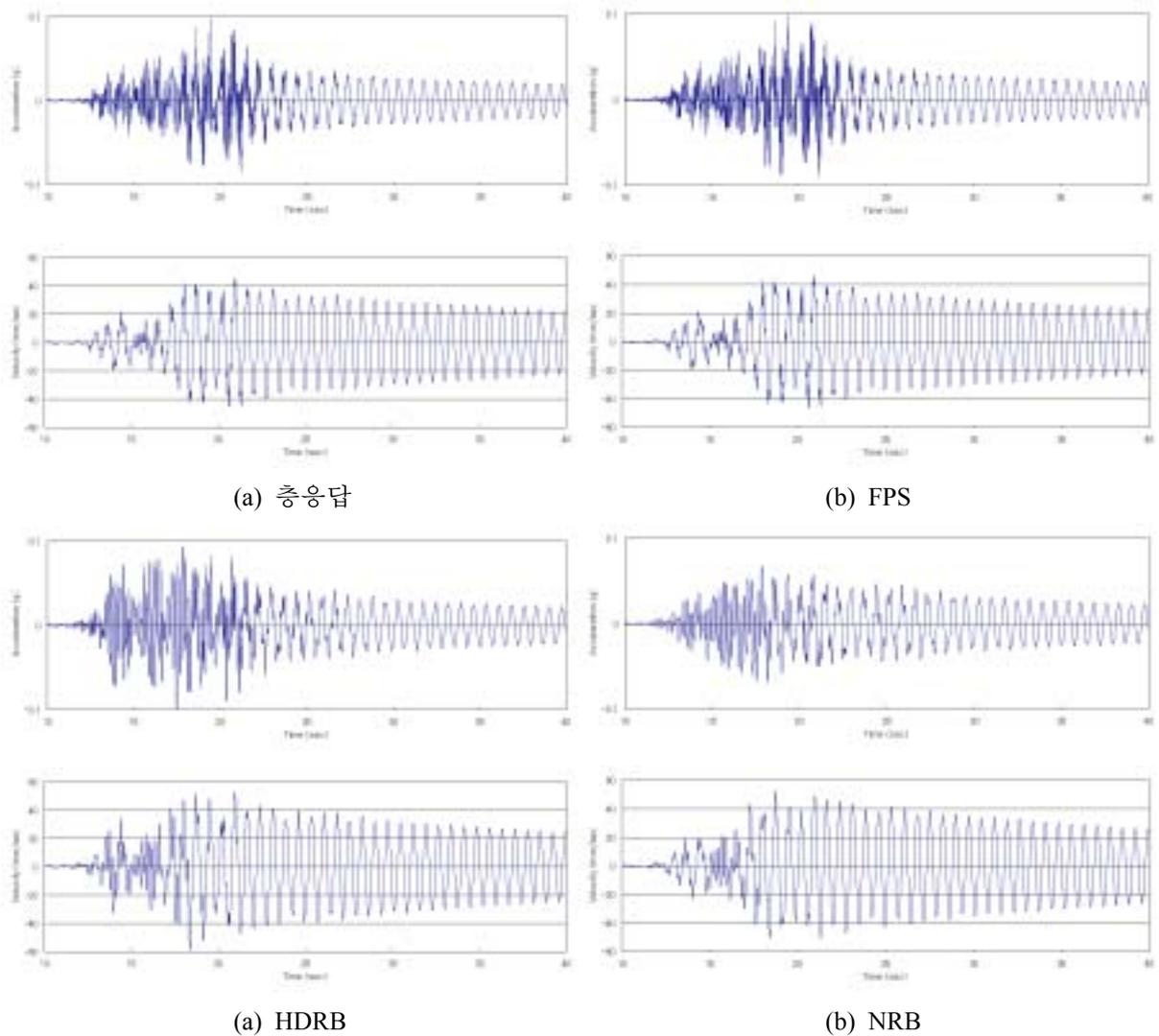


그림 12. 기기와 층에서의 응답 시간이력 (6층 구조물, 5층 기기, 목표PGA 0.1g, 1D 실험)

4.2 4층 구조물의 응답분석

4층 구조물도 6층 구조물의 경우와 동일한 방법으로 지진응답비를 계산하여 그림 13에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 4층 구조물은 지진파와 면진장치에 따라서 매우 다른 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 지진파에 따라서 비교해 보면 전체적으로 Scenario 지진의 경우는 면진거동이 나타나고 있는 반면 NRC 지진과 TCU052지진의 경우는 면진거동이 나타나고 있지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 제작한 면진장치가 NRC 지진과 TCU052지진에서 면진거동이 나타날 만큼 충분히 저주파수 특성을 가지고 있지 못한것에 기인한 것으로 판단된다.

면진장치별 지진응답을 살펴보면 FPS의 경우는 TCU052지진에서 2번 크게 증폭하는 결과를 보이고 있지만 전반적으로는 NRB와 HDRB에 비하여 작은응답을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 일반적인 것이라고 볼 수는 없는 것으로 판단되며, 지진파의 수직성분이 FPS의 응답에 영향을 미쳤거나 또는 FPS의 변위한계에 도달함으로 인해서 가속도가 크게 평가된 것으로 판단된다. NRB와 HDRB의 응답을 보면 전반적으로 HDRB의 응답이 크게 평가되고 있는 것을 알 수 있다. 이 또한 면진기기가 설치된 4층 구조물의 고유진동수가 2.93Hz이기 때문에 HDRB의 응답이 크게 평가된 것으로 판단된다. 또한 전체 시스템의 진동수가 처음의 의도대로 4Hz 부근에서 나타났을 경우에는 고무베어링의 면진효과가 더 크게 나타날 수 있었을 것으로 판단된다.

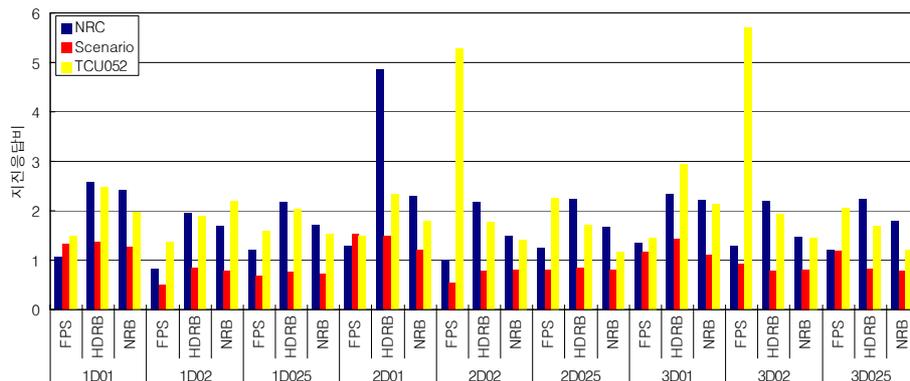
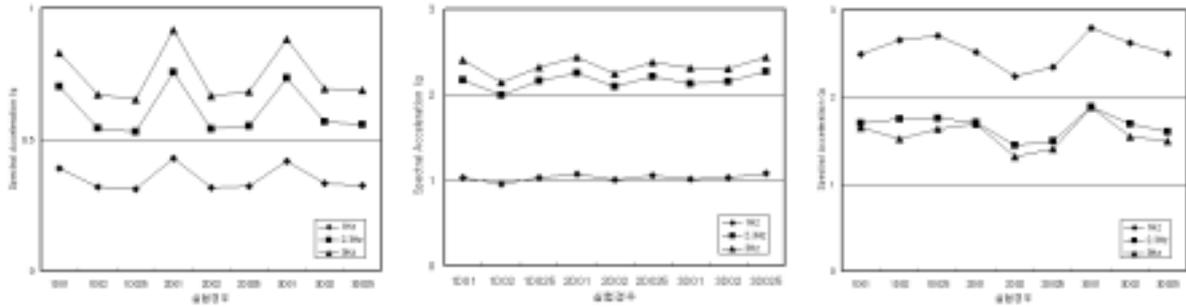


그림 13. 4층 구조물의 지진응답비

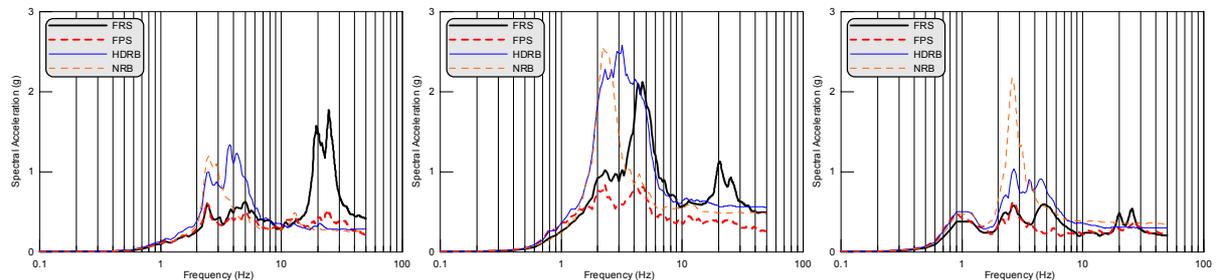
그림 13의 지진응답비를 보면 전체적으로 PGA가 증가함에 따라서 면진효과가 더 좋게 나타나고 있다. 이러한 현상이 면진장치의 고유한 성질에 기인한 것인지 아니면 진동대 입력의 차이에 의해서 기인한 것인지를 분석하기 위하여 면진장치의 진동수대에서 입력지진의 응답을 분석하였다. 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼에서 1Hz 2.3Hz 그리고 3Hz에서의 응답을 그림 14에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 PGA의 증가에 따라 면진효과가 증가하는 것으로 나타나고 있는 Scenario 지진의 경우 목표 PGA의 증가에 따른 입력운동의 차이가 명확하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. NRC 지진과 TCU052 지진의 경우에는 면진장치의 고유진동수에 해당하는 각 주파수대에서 입력값의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험경우만을 분석하여 보면 PGA와 면진효과와는 큰 상관관계를 가지고 있지 않은 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진 (b) NRC 지진 (c) TCU052 지진

그림 14. 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼에서 주파수별 응답

기기 면진효과를 좀더 자세히 분석해 보기 위하여 응답스펙트럼을 분석하여 그림 15에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 6층 구조물의 경우와는 다르게 각 면진장치별 특성이 명확하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 1Hz의 고유진동수로 설계된 FPS의 경우는 자체 고유진동수 특성이 크게 나타나고 있지는 않은 것을 알 수 있다. 그러나 NRB와 HDRB는 그 고유진동수가 비교적 명확하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉 NRB는 목표했던 2.3Hz의 고유진동수가 비교적 정확하게 나타나고 있는 것으로 판단되며 HDRB는 고감쇠 특성으로 인하여 NRB에 비하여 강성이 증가함으로 인하여 3-4Hz 부근에서 공진이 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진 (b) NRC 지진 (c) TCU052 지진

그림 15. 기기와 층에서의 응답스펙트럼 (4층 구조물, 4층 기기, 목표PGA 0.2g, 1D 실험)

4.3 2층 구조물의 응답분석

2층 구조물의 경우도 위의 구조물과 동일한 방법으로 지진응답비를 비교하여 그림 16에 도시하였다. 이 경우는 모든 구조물 중에서 가장 면진효과가 좋은 것으로 나타나고 있다. 지진파에 따라서 비교하면 TCU052지진과 같이 탁월주파수가 저주파수 영역에 위치하는 지진의 경우는 면진효과를 나타내기가 상당히 어려운 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 4층 구조물의 경우에도 동일하게 관찰할 수 있었던 현상으로서 저주파특징을 가지는 지진의 경우 면진이 쉽지 않음을 보여주고 있다.

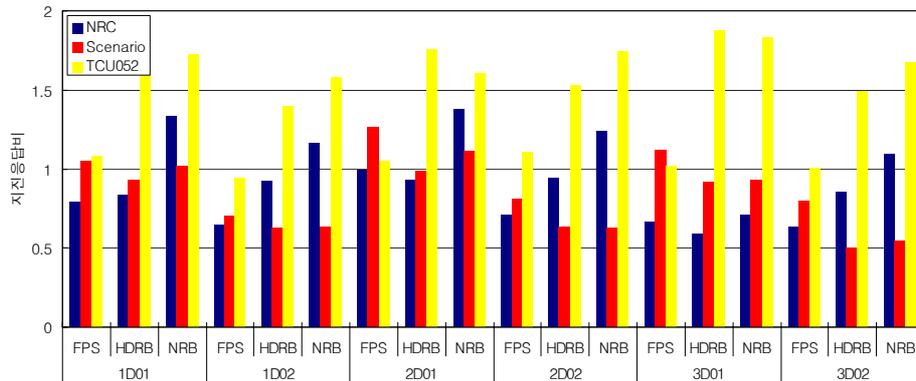
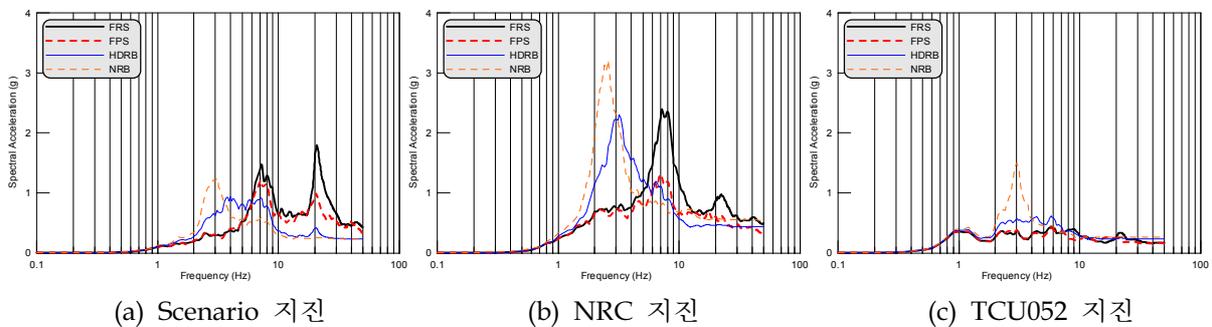


그림 16. 2층 구조물의 지진응답비

지진파와 면진장치에 따른 면진거동을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 1차원 0.2g를 목표로 실험한 경우에 대한 기기에서의 응답스펙트럼을 지진파에 따라 비교하여 그림 17에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 7Hz 부근에서 구조물의 고유진동수가 발생하는 것을 알 수 있으며 랜덤진동에 의한 모달실험에서도 두드러지게 나타난 바와 같이 20Hz 부근에서의 2차모드의 영향도 비교적 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 Scenario 지진의 경우는 탁월주파수가 20Hz 부근에서 발생하므로 그것과 공진이 발생하고있는 것을 알 수 있으며, TCU052지진의 경우는 구조물의 특성이 크게 반영되고 있지 않음을 알 수 있다. 전체적으로는 FPS의 목표진동수인 1Hz가 잘 나타나고있지 않은 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진 (b) NRC 지진 (c) TCU052 지진
그림 17. 기기와 층에서의 응답스펙트럼 (2층 구조물, Roof 기기, 목표PGA 0.2g, 1D 실험)

5. 결론

본 연구에서는 마찰진자형 베어링(FPS)과 천연고무 베어링(NRB) 및 고감쇠고무 베어링(HDRB)의 3종류의 면진장치를 이용하여 각각 주파수 특성이 다른 3종류의 구조물에 역시 탁월주파수 영역이 상이한 3종류의 지진파를 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 각 구조물에 따른 진동대 실험결과 구조물에 따라서 진동수 특성이 다르므로 층응답에 큰 영향

을 미치고 이것은 면진장치별 면진효과에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특별히 고유진동수가 낮은구조물의 경우 면진장치의 특성을 나타내지 못하는 결과를 얻을 수 있었다.

2. PGA의 변화에 따른 면진효과에 대한 분석결과 본 실험에서 수행한 PGA 범위에서는 PGA가 면진효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 비선형성이 강한 면진장치를 실제로 적용할 경우에는 그 결과가 달라질 수도 있을 것으로 판단된다.
3. 근거리 지진의 특성인 저주파수 지진의 경우 면진효과를 얻기가 쉽지 않을 것으로 나타났다. 이러한 지진은 국내를 비롯하여 많은 내진설계기준에서 제안하고 있는 설계응답스펙트럼의 주파수 범위와 같지 않으므로 향후 내진설계시 주의가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구인 "구조물 건전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 진동대 실험을 수행한 한국기계연구원과 면진장치를 제작한 (주)케이알에 감사드립니다.

참고문헌

1. Wolsong 2 Nuclear Power Plant Design Report for Reactor Building Containment Structure Stress Analysis, Design Report 8602-21020-0002-00-DR-A, Canatom Inc., March 1994.
2. 최인길, 전영선, 서정문, 원전부지 시나리오지진 설정방법에 대한 고찰, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2443/2003, 2003.
3. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
4. PEER Strong Motion Database, <http://nisee.berkeley.edu/>
5. 김민규, 전영선, 최인길, 원전기기의 내진성능 향상을 위한 면진장치 효율성 평가, 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집, 2003. 10. 30-31. 용평.
6. Zayas, V., Low, S., Bozzo, L. and Mahin, S., "Feasibility and Performance Studies on Improving Earthquake Resistance of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System," UCB/EERC-89/09, University of California, Berkeley, 1989.