

면진장치를 이용한 원전 기기의 내진성능 분석  
(A Study of Seismic Capacity of Nuclear Equipment  
with Seismic Isolation System)

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

## 한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2003년도 구조물 건전성 평가기술 개발” 연구 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2004. 5.

## 주 저 자 : 김 민 규

# 요약문

## I. 제목

면진장치를 이용한 원전 기기의 내진성능 분석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 들어 세계적으로 대규모 지진이 빈번하게 발생함에 따라 지진에 대한 원전의 안전성에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 이는 우리나라의 경우 지진 발생빈도는 낮지만 발생하였을 경우 그 피해는 상상을 초월할 정도로 대단히 크기 때문이다. 지진시 원전의 안전성을 증대시키기 위하여 구조물 전체를 면진시키는 연구가 주로 진행되어 왔으나 최근들어 기기면진을 통한 향상방안이 연구되고 있다. 기기면진은 구조물에 대한 면진에 비하여 기존의 시설에 적용이 용이하고 경제적으로도 유리한 측면이 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기기면진의 적용에 대한 필요성에 부응하여 국내 원전의 내진안전성을 증대시키기 위한 방법으로 면진장치를 이용하여 기기의 내진성능을 분석하는 것을 목적으로 하여 연구를 수행하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 원전기기의 내진안정성을 실험적으로 검토하기 위하여 진동대 실험을 수행하였다. 구조물로는 원전의 격납건물을 대상으로 한 4층 구조물과 원전 보조건물을 대상으로 한 2층 구조물 그리고 일반 고층 건물을 대상으로 한 6층 구조물을 설계 제작하여 실험에 사용하였다. 진동대 실험을 위한 지진파로는 US NRC Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 원전의 설계지진과 국내 원전부지의 확률론적 지진재해도 해석을 통하여 개발한 Scenario 지진 그리고 1999년 발생한 Chi-Chi 지진시 TCU052 site에

서 계측된 지진파를 사용하였다. 실험에 사용한 세가지 구조물은 각각 고유진동수가 1Hz, 4Hz 그리고 7Hz 부근이 되도록 제작하였다. 면진기기를 나타내기 위하여 400Kg의 강체를 사용하였으며, 면진장치로는 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무베어링(HDRB) 그리고 마찰진자형 베어링(FPS)를 선택하여 사용하였다. 따라서 주파수 특성이 다른 구조물과 지진파를 사용하였을 경우 각 면진장치에 따른 기기면진 효과를 알 수 있도록 하였다.

#### IV. 연구개발결과

FPS를 이용한 기기면진의 경우는 목표로 한 고유진동수가 잘 나타나지 않으며, 따라서 주파수 영역에 크게 영향 받지 않고 전 영역에서 고른 지진력 저감효과를 나타냈다. 그러나 면진효과는 고무베어링에 비하여 상대적으로 작으며, 지진력이 증가할 경우에는 변위한계의 결정이 지진력저감에 중요한 요소임을 알 수 있었다.

NRB와 HDRB를 사용한 진동대 실험결과 두가지 면진장치 모두 기기면진시 지진력 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 다만 발생가능한 지진의 주파수 범위와 면진하고자 하는 기기의 고유진동수 그리고 면진기기의 구조물내의 위치에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으므로 이러한 영향을 세심하게 검토하여 설계하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

결과적으로 본 연구를 통하여 구조물 내부에 존재하는 소형기기의 면진이 가능함을 보였다. 따라서 지진파와 구조물에 따른 적절한 설계가 이루어진다면 면진장치를 이용하여 20-50% 정도의 기기면진효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 연구개발 결과의 활용계획 및 건의사항

본 연구의 결과는 현재는 국내에 도입되어 있지 않은 기기면진 분야의 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단되며 향후 실제기기를 대상으로 한 연구로 발전시킴으로서 실제 기기면진을 통한 원전의 내진안정성 뿐만 아니라 일반 구조물에서의 기기면진에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

# **SUMMARY**

## **I. Project Title**

A Study of Seismic Capacity of Nuclear Equipment with Seismic Isolation System

## **II. Objective and Importance of the Project**

There are many researches about the seismic safety of the nuclear power plant because the many strong earthquakes have been happened all over the world, for example, the 1995 Kobe and the 1999 Izmit earthquakes. Even though the facilities in the plant are designed to be safe during a design basis earthquake, they may be damaged or failed by strong ground motions greater than the design basis earthquake as well as a particular earthquake of which the frequency contents are different from those in the seismic design. Therefore the study about the equipment isolation is needed for enhancement of the seismic capacity of whole nuclear power plant.

## **III. Scope and Contents of Project**

In this study, the base isolation systems for equipment are presented and the responses of each isolation system are investigated. As for the base isolation systems, a natural rubber bearing (NRB), a high damping rubber bearing (HDRB) and a friction pendulum system (FPS) are selected. The shaking table tests are carried out for three kinds of structural types. As input motions, artificial time histories enveloping the US NRC RG 1.60 spectrum and the probability-based scenario earthquake spectra developed for the Korean nuclear power plant site as well as a typical near-fault earthquake record are

used. Uniaxial, biaxial, and triaxial excitations are conducted with PGAs of 0.05, 0.1, 0.2 and 0.25g. Acceleration responses are measured at the top of the equipment model and the floors using an accelerometer. The reduction of the seismic forces transmitted to the equipment models are determined for different isolation systems and input motions.

#### **IV. Result of Project**

In this study, base isolation systems for equipment in the nuclear power plant are presented and their behavior is investigated. The NRB and the HDRB can be used for equipment isolation. But they need careful design consideration because the rubber bearings are very sensitive in the resonant frequency regions. The high damping characteristics of the HDRB decrease the amplitude in the resonant frequency region. But it is not so good in the other frequency regions, because the damping of HDRB is not much helpful for the equipment isolation. The FPS can be used as a good isolation system for equipment for all frequency regions but the displace limit of FPS should be considered

#### **V. Proposal for Application**

The results of this study can be used for the fundamental materials of the equipment isolation field in Korea. It can be adopted to the real equipment of the nuclear power plant for the enhancement of the seismic safety of whole nuclear power plant. The results of this study can be also used to the equipment isolation of general high rise building.

# CONTENTS

Chapter 1 Introduction .....	1
Section 1 Research Objectives .....	2
Section 2 State of the Art .....	3
Section 3 Research Approach .....	5
Chapter 2 Introduction of Shaking Table Test .....	7
Section 1 Introduction .....	7
Section 2 Test Model .....	8
1. Model 1 (Containment Model) .....	8
2. Model 2 (Auxiliary Building Model) .....	11
3. Model 3 (High Rise Building Model) .....	13
Section 3 Input Seismic Motion .....	15
Section 4 Design of Seismic Isolation System .....	20
1. NRB and HDRB .....	20
2. FPS .....	22
Chapter 3 Characteristic Test of Seismic Isolation Devices .....	25
Section 1 Introduction .....	25
Section 2 Test Method .....	26
1. NRB and HDRB .....	26
2. FPS .....	28
Section 3 Test Results .....	30
1. NRB and HDRB .....	30
2. FPS .....	34
Chapter 4 Test Results and Analysis .....	37
Section 1 Introduction .....	37

Section 2 Random Vibration Test .....	41
Section 3 The Results of Containment Model .....	44
1. PGA .....	44
2. Seismic Response Ratio .....	50
3. Time History .....	58
4. Response Spectrum .....	60
Section 4 Auxiliary Building Model .....	62
1. PGA .....	62
2. Seismic Response Ratio .....	66
3. Time History .....	71
4. Response Spectrum .....	74
Section 5 High Rise Building Model .....	77
1. PGA .....	77
2. Seismic Response Ratio .....	80
3. Time History .....	84
4. Response Spectrum .....	88
Chapter 5 Conclusion .....	91
References .....	95
Appendix .....	97

# 목 차

제 출 문 .....	iii
요 약 문 .....	v
SUMMARY .....	vii
CONTENTS .....	ix
목 차 .....	xi
표 차례 .....	xiii
그림차례 .....	xv
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구목적 .....	2
제 2 절 연구동향 .....	3
1. 기기면진 연구 .....	3
2. 면진장치 연구 .....	3
제 3 절 연구방법 .....	5
제 2 장 진동대 실험 개요 .....	7
제 1 절 서론 .....	7
제 2 절 실험대상 구조물 및 모형 .....	8
1. 모형 1 (격납건물 모형) .....	8
2. 모형 2 (보조건물 모형) .....	11
3. 모형 3 (고충건물 모형) .....	13
제 3 절 입력지진파 .....	15
제 4 절 면진장치의 설계 .....	20
1. NRB와 HDRB .....	20
2. FPS .....	22
제 3 장 면진장치 특성시험 .....	25
제 1 절 개 요 .....	25
제 2 절 실험방법 .....	27

1. NRB와 HDRB .....	27
2. FPS .....	28
제 3 절 실험결과 .....	30
1. NRB와 HDRB .....	30
2. FPS .....	34
 제 4 장 진동대 실험결과 및 분석 .....	37
제 1 절 개요 .....	37
제 2 절 랜덤진동시험에 대한 구조물 동특성 추정 .....	41
제 3 절 격납건물 모형 .....	44
1. PGA분석 .....	44
2. 지진응답비 분석 .....	50
3. 시간이력 분석 .....	58
4. 응답스펙트럼 분석 .....	60
제 4 절 원전 구조물 모형 (2층) .....	62
1. PGA분석 .....	62
2. 지진응답비 분석 .....	66
3. 시간이력 분석 .....	71
4. 응답스펙트럼 분석 .....	74
제 5 절 고층건물 모형 .....	77
1. PGA분석 .....	77
2. 지진응답비 분석 .....	80
3. 시간이력 분석 .....	84
4. 응답스펙트럼 분석 .....	88
 제 5 장 결론 .....	91
 참고문헌 .....	95
 부록 .....	97

## 표 차례

표 2.1 월성원전 2호기 격납건물의 고유진동수(Hz) .....	10
표 2.2 4층 구조물 실험 모형 부재의 제원 .....	11
표 2.3 6층 구조물 실험 모형 부재의 제원 .....	13
표 3.1 FPS의 특성시험 방법 .....	29
표 3.2 NRB와 HDRB의 감쇠비 변화 .....	33
표 4.1 4층 구조물의 실험순서 .....	38
표 4.2 2층 구조물의 실험순서 .....	39
표 4.3 6층 구조물의 실험순서 .....	40
표 4.4 실험대상 구조물의 고유진동수 .....	43
표 4.5 4층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g) .....	44
표 4.6 4층 구조물 지진응답 (4층 기기, PGA:g) .....	45
표 4.7 4층 구조물에서 목표지진과 실제 입력된 지진의 PGA 비교 .....	46
표 4.8 4층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기) .....	50
표 4.9 4층 구조물 기기 지진응답비 (4층 기기, 4층 기준) .....	53
표 4.10 4층 구조물 기기 지진응답비율 (4층 기기, 1층 기준) .....	56
표 4.11 2층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g) .....	62
표 4.12 2층 구조물 지진응답 (2층 기기, PGA:g) .....	63
표 4.13 4층 구조물에서 목표지진과 실제 입력된 지진의 PGA 비교 .....	64
표 4.14 2층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기) .....	66
표 4.15 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 2층 기준) .....	68
표 4.16 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 1층 기준) .....	70
표 4.17 6층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g) .....	77
표 4.18 6층 구조물 지진응답 (5층 기기, PGA:g) .....	78
표 4.19 6층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기) .....	80
표 4.20 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 5층 기준) .....	81
표 4.21 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 1층 기준) .....	82

## 그림 차례

그림 2.1 월성 2호기 격납건물의 모형 .....	9
그림 2.2 4층 구조물 실험모형의 제원 (격납건물 모형) .....	9
그림 2.3 4층 구조 실험모형 (격납건물 모형) .....	10
그림 2.4 2층 구조물 실험모형의 제원 (보조건물 모형) .....	12
그림 2.5 2층 구조물 실험모형 (보조건물 모형) .....	12
그림 2.6 6층 구조물 실험모형의 제원 (고층건물 모형) .....	14
그림 2.7 6층 구조물 실험모형 (고층건물 모형) .....	14
그림 2.8 입력지진의 가속도 시간이력 (NRC) .....	16
그림 2.9 입력지진의 가속도 시간이력 (Scenario) .....	17
그림 2.10 입력지진의 가속도 시간이력 (TCU052) .....	18
그림 2.11 입력지진의 가속도 응답스펙트럼 .....	19
그림 2.12 NRB와 HDRB의 제작도면 .....	21
그림 2.13 실험에 사용한 고무베어링 .....	22
그림 2.14 FPS 제작도면 .....	23
그림 2.15 실험에 사용한 FPS .....	24
그림 3.1 특성시험장치 .....	26
그림 3.2 특성시험장치에 설치된 고무베어링 .....	26
그림 3.3 특성시험을 위한 수평하중의 변위-시간이력 (NRB와 HDRB) ....	27
그림 3.4 고무베어링의 수평전단시험에 의한 하중-변위 곡선 .....	31
그림 3.5 적층 고무 .....	32
그림 3.6 수평전단 시험시 고무베어링의 휨거동 .....	33
그림 3.7 고무베어링의 수직하중에 의한 하중-변위 곡선 .....	34
그림 3.8 FPS의 하중-변위이력 .....	36
그림 4.1 랜덤진동에 의한 실험결과 .....	42
그림 4.2 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼 (4층 구조) .....	48
그림 4.3 4층 구조물 기기 지진응답비율 (1층기기) .....	51
그림 4.4 4층 구조물 기기 지진응답비율 (4층 기기, 4층 기준) .....	53

그림 4.5 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼에서 주파수별 응답	55
그림 4.6 4층 구조물 기기 지진응답비 (4층기기, 1층 기준)	57
그림 4.7 NRC 지진시 응답(1D, 0.2g, 4층 구조물 4층 기기)	59
그림 4.8 NRC 지진시 응답(1D, 0.2g, 4층 구조물 1층 기기)	59
그림 4.9 Scenario 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)	60
그림 4.10 TCU052 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)	61
그림 4.11 NRC 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)	61
그림 4.12 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼 (2층 구조)	65
그림 4.13 2층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)	67
그림 4.14 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 2층 기준)	68
그림 4.15 2층 구조물 기기 지진응답비 (2층 기기, 1층 기준)	70
그림 4.16 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, Scenario)	71
그림 4.17 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, TCU052)	72
그림 4.18 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, NRC)	72
그림 4.19 2층 구조물 2층 FPS에서의 변위응답 (0.2g, 1-D)	74
그림 4.20 2층 구조물 2층 기기에서의 응답스펙트럼 (0.2g, 1-D)	75
그림 4.21 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼 (6층 구조물)	79
그림 4.22 6층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)	80
그림 4.23 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 5층 기준)	81
그림 4.24 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 1층 기준)	83
그림 4.25 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, Scenario)	85
그림 4.26 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, TCU052)	85
그림 4.27 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, NRC)	86
그림 4.28 6층 구조물의 5층 FPS에서의 변위응답 (0.1g, 1-D)	87
그림 4.29 6층 구조물 2층 기기에서의 응답스펙트럼 (0.2g, 1-D)	89

## 제 1 장 서 론

원전의 격납건물은 그 중요도나 안전요구도에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하는 건물이다. 불시에 발생할 수 있는 외부사건으로부터 경미한 손상을 입었을 경우 그에 의한 파급효과가 매우 크기 때문이다. 따라서 원전구조물 특히 원전격납건물은 설계단계에서부터 세심한 주의가 요구되며 가동중에도 항시 그 안전성에 대한 검토와 확인이 필요한 구조물이다. 이러한 이유로 원전의 격납건물은 다른 모든 구조물에 비하여 최고의 안전허용치를 적용하여 내진설계를 수행하고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 격납건물 내부의 기기들이 지진시 손상을 입었을 경우 그로 인하여 노심이 손상을 입고 결과적으로 격납건물에 치명적인 손상이 발생할 가능성을 배제할 수 없는 현실이다. 따라서 본 연구에서는 원전 구조물 내부에 위치하는 기기의 면진을 통하여 지진력저감을 실현하기 위한 연구의 일환으로 모형구조물을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 모형의 기기에는 3가지의 면진장치를 설치하여 각 면진장치에 따른 면진효과를 분석하고 기기면진에 적합한 면진장치를 선정하였다. 면진장치로는 가장 널리 사용하는 천연고무베어링 (Natural Rubber Bearing, NRB), 고감쇠고무베어링 (High Damping Rubber Bearing, HDRB) 그리고 마찰진자형 베어링 (Friction Pendulum System, FPS)의 세가지 장치를 이용하였다.

면진장치는 전세계적으로 교량이나 건축물 등의 구조물의 내진설계에 많이 사용되고 있으며, 최근에는 국내에도 그 사용빈도가 증가하고 있는 실정이다. 구조면진과 비교하여 기기면진이 다른점은 구조물들에 비하여 상대적으로 중량이 매우 작다는 점이다. 이러한 점은 적절한 강성을 가지는 면진장치의 설계를 어렵게 하는 요인으로 작용하기도 한다. 따라서 저중량의 기기면진을 위해서는 면진장치의 선택 및 설계에 세심한 주의가 필요하다.

본 연구에서는 원전 격납건물과 보조건물에 설치된 기기를 대상으로 한 면진을 통한 전체시스템의 안정성증대를 목적으로 진동대 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 3종의 모형구조물을 선정하였으며, 강체를 이용하여

구조물 내부의 기기를 모형화 하였다. 면진장치에 따른 면진효과를 분석하기 위하여 조건에 맞는 3종의 면진장치를 선정하여 구조물 내부에 설치하였다. 진동대 실험을 위하여 3종의 지진파를 선정하였다. 선정된 지진파는 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 계측된 실제 근거리 지진 기록과 우리나라원전부지의 확률론적 지진재해도에 근거한 인공지진파 그리고 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60[1]의 표준응답 스펙트럼을 사용하여 작성된 지진파이다. 3종의 구조물에 바닥층과 중간층에 면진된 기기를 설치하여 PGA를 증가시키면서 3종의 지진파를 가진하여 각 층과 기기에서의 가속도와 변위를 측정하였다.

## 제 1 절 연구목적

원전구조물 내부의 기기는 그 중요도가 매우 크다. 원전 내부의 기기가 지진시 손상을 입어 그 기능을 상실하였을 경우 그로 인하여 원전의 노심이 손상되고 그 결과 원전 전체시스템에 치명적인 피해가 발생할 수 있으며, 이러한 피해는 주변환경에 막대한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 따라서 구조물 전체를 면진시킴으로써 많은 경제적인 부담을 초래하는 방법보다는 각각의 기기를 면진하여 그 효과를 극대화 할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구는 원전 구조물 내에 존재하는 기기의 면진을 통하여 지진력을 저감시키는 기법을 개발하고 저감장치의 효율성과 대상기기의 적용성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

기기면진을 통한 저감장치의 효율성과 기기의 적용성을 평가하기 위해서는 사용가능한 면진장치의 종류를 파악하여 각 면진장치의 특성에 맞게 설계 하여 기기에 설치를 해야 하며, 발생가능한 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하여야 한다. 면진장치를 적용한 기기의 거동은 해석적으로 정확하게 규명하기가 쉽지 않으며, 근래 발생한 지진에서는 연직방향 성분이 두드러지게 나타나므로 연직방향 진동 성분에 대한 면진장치의 거동은 실험을 통하여 않으면 그 거동을 정확히 예측하는 것이 쉽지 않기 때문이다.

## 제 2 절 연구동향

### 1. 기기면진 연구

원전기기에 대한 면진연구도 최근 일부분 연구가 수행되고 있지만[2] 대부분의 기기면진에 대한 연구는 주로 변전소를 비롯한 전기기기들을 대상으로 연구가 수행되었다[3]. 이러한 이유는 과거의 지진시 실제로 원전 구조물 또는 기기의 피해가 발생한 예가 보고되고 있지 않은 반면, 그 외 발전설비등의 기기등이 지진시 피해를 입은 사례를 여러 건이 보고되고 있기 때문이다. 원전에서 이러한 피해가 발생하지 않은 것은 원전의 안전성이 그만큼 높게 건설되고 있는 것을 의미하는 것이다. 그러나 원전은 최고의 안전성을 유지해야 하는 구조물인 만큼 이에 대한 연구는 반드시 필요하다고 할 수 있다.

### 2. 면진장치 연구

외부로부터 가해지는 지진하중으로부터 구조물을 안전하게 유지시킬 목적으로 많은 종류의 면진장치가 사용되고 있다. 이러한 면진장치들은 많은 경우 구조물과 기초사이에 설치가 됨으로 인하여 기초로부터 전해지는 지진력을 구조물의 상부로 전달시키지 않도록 하는 역할을 하게된다. 면진장치의 기계적 특성평가에 관한 연구는 과거에 많이 수행되어 다양한 종류의 면진장치가 실제 구조물에 설치된 사례가 많이 있다. 실험적 연구는 미국, 일본, 뉴질랜드 등 대규모 지진이 빈번하게 발생하는 국가를 중심으로 많이 수행되어 왔으며, 국내의 경우 면진장치를 생산하는 기업체 등에서 일부 수행한 결과들이 있다. 국내의 연구로는 김대곤 등[4]의 연구에서는 온도에 따른 고무베어링의 특성을 평가하였으며 유봉 등[5]의 연구에서는 LRB를 사용한 축소시험모델을 이용한 특성평가를 수행하였다. 전영선 등[6]은 실제 사용하는 LRB에 대하여 다양한 실험조건에서 실험을 수행하여 거동특성 및 기계적 특성을 평가한 바 있다. 면진장치별로 살펴보면 다음과 같다.

## 가. 마찰진자형 지진격리장치 (Friction Pendulum System, FPS)

FPS는 고무계 베어링에 비하여 내구성이 우수하고 상부하중의 변화에 따라 고유진동수가 변하지 않는다는 장점을 가지고 있어 1990년 이후 각광을 받고 있는 면진장치이다. 본 연구와 같이 상부하중이 작은 기기를 대상으로 한 면진에는 적용이 용이한 것으로 판단이 된다. FPS에 대한 연구는 1990년 Zayas 등[7]에 의하여 시작되어 외국의 경우에는 구조물에 적용한 사례도 많이 보고되고 있다. 그러나 국내의 경우 구조물에 적용된 것은 없고 현재 발전시설이나 원전시설들에 대한 적용성이 검토되고 있는 단계이다. 기계적 특성에 관해서는 김영중 등[8]과 이경진 등[9]이 실험에 의하여 분석을 수행하였고, 최근에는 김대곤 등[10]이 FPS를 이용하여 원전 주제어실의 면진에 관한 해석적인 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우 실제로 구조물에 적용할 수 있는 수준의 내구성을 가지고 있는 FPS의 제작이 현실적으로 어려운 상황에 있으므로 구조물 또는 기기에 적용하기 위해서는 다양한 실험 및 해석적인 연구를 통한 많은 관련자료를 확보하여야 할 것으로 판단된다.

## 나. 고무 베어링 (Rubber Bearing, RB)

본 연구에서 사용한 고무베어링은 전술한 바와 같이 두종류로서 천연고무베어링 (Natural Rubber Bearing; NRB)과 고감쇠 고무 베어링(High Damping Rubber Bearing; HDRB)이다. 고무베어링으로서 실제로 가장 널리 사용하는 납삽입 적층고무 베어링(Lead Rubber Bearing; LRB)를 사용하지 않은 것은 기기면진의 경우 구조물의 면진과는 달리 상부하중이 상대적으로 작으므로 인하여 LRB를 사용할 경우 면진효과를 발휘하기 어렵다는 판단에 기인한 것이다. 실제로 본 실험을 위하여 LRB의 설계 및 제작을 시도하였으나 삽입된 납의 강성에 의해서 상부중량 400kg의 경우는 면진효과를 전혀 발휘할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 면진장치의 횡방향 강성을 줄이기 위한 방편으로 납을 삽입하지 않은 NRB를 선택하게 되었고, NRB에서 부족한 감쇠효과를 보강하기 위하여 HDRB를 선택하여 두 가지 장치에 의한 면진거동을 살펴보게 되었다.

NRB는 면진장치로서 널리 사용되었으나 감쇠효과가 거의 없으므로 최

근에는 별로 사용되지 않는 면진장치이며 HDRB는 감쇠특성이 뛰어난 고무를 이용하여 제작하여 LRB와 같은 감쇠특성을 얻고자 하는 면진장치로서 최근 들어 널리 사용하고 있는 면진장치이다. 고무베어링에 대한 연구는 Kelly 등[11]에 의해서 주도적으로 진행되고 있으며 국내에서도 이것을 이용한 많은 연구들이 수행되고 있는 상황이다. 고감쇠고무를 이용한 면진장치에 대한 연구는 국내에서는 거의 수행된 바가 없으나 외국의 경우 이에 대한 실험적, 해석적 연구가 다양하게 수행되고 있는 실정이다. Hwang 과 Ku[12] 는 HDRB의 해석적인 모형을 개발하여 실험결과와의 비교분석을 수행하였으며, Watanabe 등[13]은 HDRB를 2층 구조물의 면진장치로 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 또한 Abe 등[14]은 NRB, LRB, HDRB를 모두 교량의 면진에 사용하여 그 결과를 비교한 바 있다.

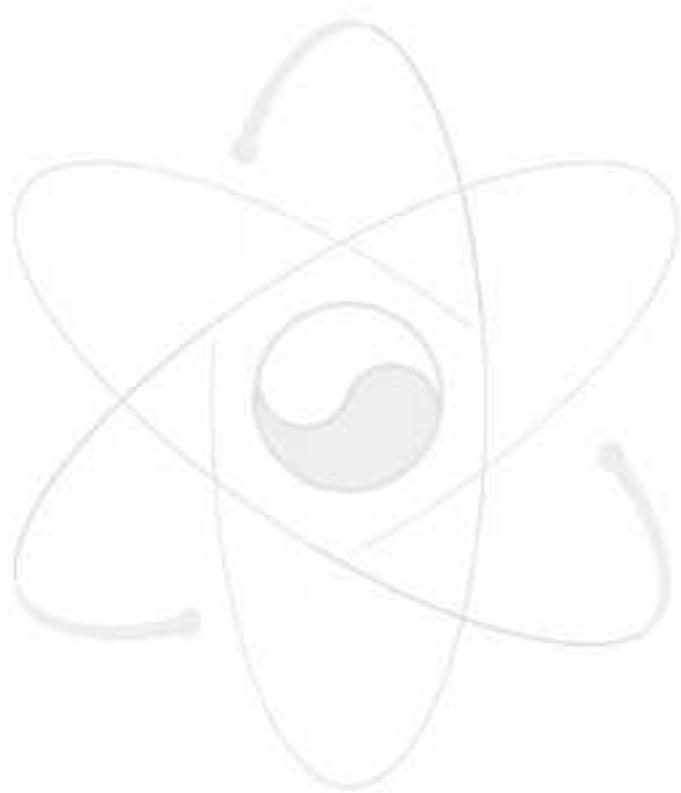
### 제 3 절 연구방법

기기면진을 위한 효과적인 면진거동을 얻기 위하여 실제의 구조물을 제작하여 실험에 사용한다는 것은 현실적으로 불가능하고 우리나라와 같은 경우 일반 구조물에 기기면진을 시켜놓고 지진이 발생하기를 기대하는 것도 어려운 일이다. 따라서 목표로 하는 구조물과 주파수대가 유사한 3가지의 모형구조물을 가장 제작이 용이한 철골구조로 제작하여 실험에 사용하였다. 구조물 내부에 존재하는 기기를 모사하기 위하여 400kg의 강체를 사용하였다. 일반적으로 면진된 기기들의 변위는 면진층에서 대부분 발생하므로 이러한 가정이 타당할 것으로 판단된다.

입력지진으로는 국내의 원전설계기준으로 사용하는 US NRC Reg. Guide 1.60의 기준에 따른 인공지진가속도 시간이력을 1차로 사용하였다. 또한 국내 원전부지의 부지응답특성해석을 통하여 개발된 스펙트럼을 포괄하는 인공지진을 사용하였다. 또한 최근 그 발생빈도가 높은 근거리 지진의 특성을 반영한 지진파에 의한 면진기기의 거동을 살펴보기 위하여 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 TCU052 지점에서 계측된 지진기록[15]을 사용한 실험을 수행하였다. 진동대 실험시 지진파의 가진차원에 따라 변화하는 기기의 면진거동을 살펴보기 위하여 1D, 2D 그리고 3D 가진을 실시

하여 지진파의 수직성분이 기기면진에 미치는 영향도 검토할 수 있도록 하였다.

계측은 각 기기의 중앙에서 가속도계를 사용하여 절대가속도를 측정하였으며, 특별히 FPS를 이용하여 면진한 기기의 경우에는 FPS가 설치되어 있는 충과 면진기기와의 상대변위를 LVDT를 이용하여 계측하였다.



## 제 2 장 진동대 실험 개요

### 제 1 절 서론

본 실험에서는 진동수특성이 다른 세가지 구조물을 대상으로 각 구조물 내부에 존재하는 기기의 면진거동을 살펴보기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 면진장치에 따른 거동을 살펴보기 위하여 3종류의 면진장치를 선정하여 실험에 사용하였다. 선정된 면진장치는 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB), 고감쇠고무베어링(High Damping Rubber Bearing; HDRB) 그리고 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System; FPS)이다. 또한 지진파에 따른 구조물 및 면진기기의 거동을 살펴보기 위하여 탁월주파수 영역이 상이한 세종류의 지진파를 이용하였다. 국내 원전의 내진설계 시 설계지진으로 사용하는 US NRC Reg. Guide 1.60의 표준설계응답스펙트럼을 이용한 인공지진과 국내 원전부지의 확률론적 지진재해도 해석을 통하여 생성된 시나리오 지진의 응답스펙트럼을 이용하여 생성된 인공지진 그리고 최근 발생한 대표적인 근거리 지진기록중의 하나인 1999년 대만 Chi-Chi 지진시 계측된 지진기록을 사용하였다. 진동대 실험시 PGA를 달리하면서 실험을 수행하였으며, 가진 차원에 따른 면진거동의 변화를 살펴보기 위하여 1-D, 2-D 그리고 3-D로 가진하여 실험을 수행하였다. 각 모형기기의 중앙부에 가속도계를 설치하여 3방향 가속도를 측정하였고 각 충에서는 수평 2방향 가속도만을 측정하였다. 기기가 설치되어 있는 충에서는 3방향 가속도를 측정함으로서 연직방향 운동성분에 의한 거동을 살펴볼 수 있도록 하였다. 또한 FPS로 면진된 기기에는 LVDT를 설치하여 충바닥과의 상대변위를 계측할 수 있도록 하였다.

## 제 2 절 실험대상 구조물 및 모형

전술한 바와 같이 실험에서는 세종류의 구조물을 대상으로 하였다. 우선적으로 원전의 격납건물을 목표로 제작한 구조물을 선정하였고 또 원전내 보조건물을 목표로 한 구조물을 제작하여 실험에 사용하였다. 마지막으로 원전에는 존재하지 않는 장주기 특성을 가지는 고층건물을 설계하여 실험에 사용하였다. 각 실험모형에 대한 설명은 다음과 같다.

### 1. 모형 1 (격납건물 모형)

본 연구에서는 특별히 월성원전 2호기 격납건물을 목표로 설정하였다. 그것은 월성원전이 국내에서 최초로 도입된 중수로형 발전소일 뿐만 아니라, 월성원전 인근에 발견된 단층의 활성 여부가 학계에 초미의 관심사로 대두되고 있는 실정이기 때문이다. 목표로 하는 격납건물의 형상은 다음의 그림 2.1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물은 원통형 shell 구조를 가지고 있으며, 직경은 43.6m 이고 둠구조를 제외한 부분의 높이는 48.14m 이다. 따라서 높이대 폭의 비가 이와 유사한 실험모형을 만들기 위하여 다음 그림 2.2와 같은 3차원 프레임구조를 선택하였다. 실험대상으로 선택한 모형 구조는 4층으로 이루어진 철골구조로서 기둥의 부재는 강봉을 선택하였고 슬래브는 강판을 사용하도록 하였다. 격납건물의 경우 콘크리트 구조물이므로 강구조로 실험모형을 선정하는 것에 약간의 무리가 있을 수 있으나 모형제작의 편의성과 실험의 정확성 여부를 고려할 때 강구조를 선택하는 것이 적절할 것으로 판단되었다. 제작된 실험모형을 그림 2.3에서 보여주고 있다.

본 실험의 목적은 월성원전 2호기 격납건물을 대상으로 지진파에 따른 격납건물의 응답거동을 분석하고 격납건물내의 기기에 대한 면진장치를 적용할때의 면진효과에 대한 타당성을 분석하는 것이다. 따라서 월성 2호기 격납건물과 유사한 고유주파수를 갖는 구조물을 선정하여 실험을 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 월성원전 2호기 설계자료를 검토한 결과 각 해석모형에 따른 격납건물의 고유주파수는 표 2.1에 정리하였다.



그림 2.1 월성 2호기 격납건물의 모형 [16]

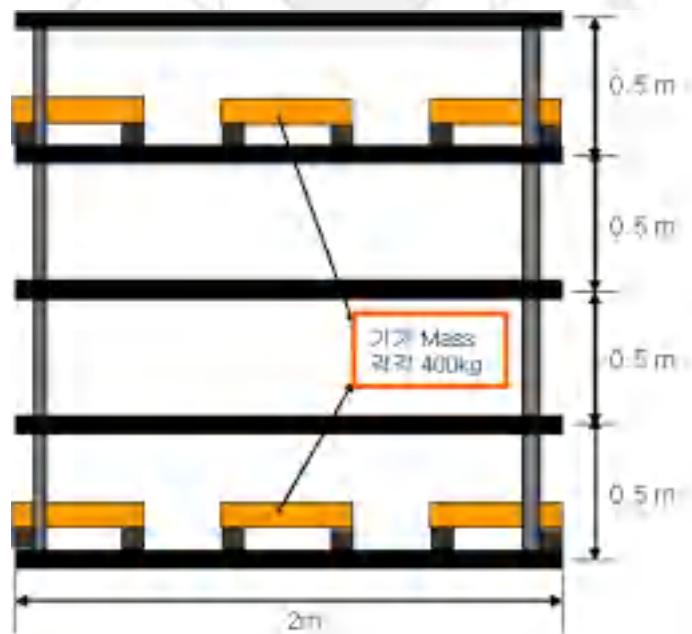


그림 2.2 4층 구조물 실험모형의 제원 (격납건물 모형)



그림 2.3 4층 구조 실험모형 (격납건물 모형)

표 2.1 월성원전 2호기 격납건물의 고유진동수(Hz) [17]

		모 형					
		축대칭 모형			3차원 모형		
모드		S	M	H	S	M	H
수평	B-D	3.70	3.96	4.05	3.54	3.74	3.80
	A-C	3.70	3.96	4.05	3.60	3.80	4.20
수직		8.40	8.69	8.75	7.91	8.05	8.08

여기서 격납건물의 해석모형에 따른 고유주파수에 약간의 차이가 발생하는 것은 격납건물은 원통형 구조로서 축대칭 모형으로도 수치모형화가 가능하지만 격납건물내부 구조물은 원통형 구조물이 아니므로 축대칭 모형을 사용한 경우와 3차원 모형을 사용한 경우에 따라 차이가 발생한 것이다. 또한 수평방향 모드에서 B-D 방향과 A-C 방향은 수평면상에서 직교하는 진동 방향을 나타내는 것으로서 축대칭 모형에서는 차이가 발생하지 않지만 3차원 모형에서는 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 모형

별 S, M, H 는 지반조건을 나타낸 것으로서 지반조건에 따라서 고유주파수의 차이가 발생하는 것을 의미한다. 여기서 S는 soft, M은 medium 그리고 H는 Hard dynamic rock condition을 의미한다. 지반이 연약지반일 경우 고유진동수가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 진동대 실험을 위한 모형은 고유진동수가 4Hz 정도의 구조물로 설계하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 목표로 하는 고유주기가 4Hz인 모형의 제작을 위한 기둥과 슬래브의 제원은 표 2.2에 정리한 바와 같다.

표 2.2 4층 구조물 실험 모형 부재의 제원

항목		단위	물성치
강관기둥	외경	cm	4.27
	내경	cm	3.55
	길이	cm	50.0
슬래브	제원	cm	200×120×4.0

또한 본 실험의 목적은 원전 격납건물내의 기기에 대한 면진효과를 분석하고자 하는 것이므로 기기를 모사하기 위하여 중량 400kg의 강재를 이용하여 기기를 대신하도록 하였다. 실제로 격납건물내의 기기는 지진발생 시 강체거동을 하는 것으로 알려져 있으므로 이와 같은 가정은 타당할 것으로 판단된다. 면진기기는 그림 2.3에서 보는 바와 같이 1층과 4층의 바닥면에 각 면진장치로 면진시킨 후 설치하였다.

## 2. 모형 2 (보조건물 모형)

원전에는 격납건물을 제외하고도 많은 보조건물이 존재한다. 이러한 구조물들은 격납건물보다는 중요도가 떨어지지만 보조건물의 안전성에 손상을 입었을 경우나 보조건물 내부의 기기가 손상을 입었을 경우 원전 전체의 안전성에 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 원전구조물의 고유진동수에 해당하는 8Hz 부근의 고유진동수를 갖는 구조물을 제작하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 구조물은 다음 그림과 같이 격납건물 모형의 2개층을 제거함으로서 목표로 한 고유진동수가 발생하도록 하였다. 실험모형의 제

원은 그림 2.4와 같고 제작된 실험모형의 사진은 그림 2.5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 면진기기는 1층의 바닥면과 지붕에 설치하였다.

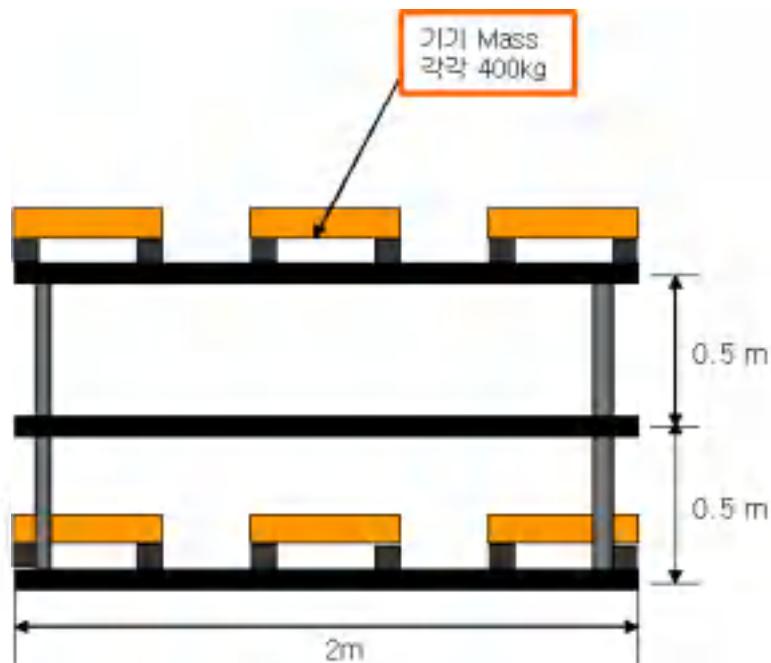


그림 2.4 2층 구조물 실험모형의 제원 (보조건물 모형)



그림 2.5 2층 구조물 실험모형 (보조건물 모형)

### 3. 모형 3 (고층건물 모형)

마지막으로 일반 건물의 진동수에 해당하는 1Hz 부근의 진동수를 가지는 구조물에 대한 기기면진거동을 살펴보기 위한 구조물을 제작하였다. 저 진동수 구조물을 만들기 위하여 4층 구조물에 2층을 더하여 6층 구조물로 설계하였으나 목표한 만큼의 진동수가 발생하지 않아서 기둥의 강성을 줄여서 다시 제작하였다. 제작한 구조물의 제원은 다음의 표 2.3에 정리하였다.

표 2.3 6층 구조물 실험 모형 부재의 제원

항 목	단 위	물성치
강관기둥	외경	cm
	내경	cm
	길이	cm
슬래브	제원	200×120×4.0

목표대로 설계하여 제작한 구조물의 제원은 그림 2.6에 제시하였고 제작된 실험대상구조물은 그림 2.7에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진 기기는 1층면과 5층 바닥면에 설치하였다.



그림 2.6 6층 구조물 실험모형의 제원 (고층건물 모형)



그림 2.7 6층 구조물 실험모형 (고층건물 모형)

### 제 3 절 입력지진파

본 실험에서는 세종류의 지진파를 이용하여 실험을 수행하였다. 우선적으로 국내 원전의 내진설계시 사용하는 US NRC Reg. guide 1.60에서 제시하고 있는 표준설계응답스펙트럼에 준용하여 생성된 인공지진가속도 시간이력을 사용하였다. 이 기준은 미국 서부지역의 원전설계기준으로서 국내의 원전설계시에도 사용하고 있는 표준설계 응답스펙트럼이므로 본 실험과 같이 원전을 대상으로 하고 있는 경우에는 반드시 필요한 지진파이다. 두 번째로는 국내 원전부지의 확률론적 지진재해도해석의 재분해를 통하여 작성된 시나리오 지진에 대한 응답스펙트럼을 기준으로 생성한 인공지진파를 사용하였다. 국내 원전의 부지는 미국의 서부지역과는 지반특성이 상이하므로 그 지반특성을 고려한 지진파에 의한 실험이 필요하다. 마지막으로 최근에 발생하고 있는 근거리 지진의 영향을 비교해 보기 위하여 1999년에 대만에서 발생한 대표적인 근거리 지진인 Chi-Chi 지진시 계측된 지진기록을 이용한 실험을 수행하였다. 표기의 편의상 각각의 이름을 US NRC Reg. guide 1.60을 기준을 생성한 지진은 NRC로, 국내 부지응답해석을 통하여 개발된 응답스펙트럼에 맞게 생성된 인공지진은 Scenario 그리고 Chi-Chi 지진시 계측된 지진기록은 계측지점의 이름을 따라서 TCU052라고 하여 분석을 수행하였다. 각각의 지진은 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 3단계로 하여 사용하였으며 0.1g의 경우에 각각의 가속도 시간이력은 다음의 그림 2.8~2.10에서 제시한 바와 같고 각 지진파의 응답스펙트럼은 그림 2.11에서 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수평 1방향의 PGA는 0.1g로 고정하였지만 수직성분은 각 지진의 특성에 맞게 조정하여 사용하였으며, TCU052지진의 경우는 계측된 비율대로 크기조절을 통하여 사용하였다.

응답스펙트럼의 비교를 통해서 보는 바와 같이 입력으로 사용한 지진은 실험의 목적에 부합되도록 탁월주파수 영역이 확연하게 차이가 나는 것을 알 수 있다. Scenario는 25Hz, NRC는 2.5Hz, 그리고 TCU052의 경우 1Hz 부근에서 탁월주파수대가 형성이 되고 그 외의 영역에서는 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.

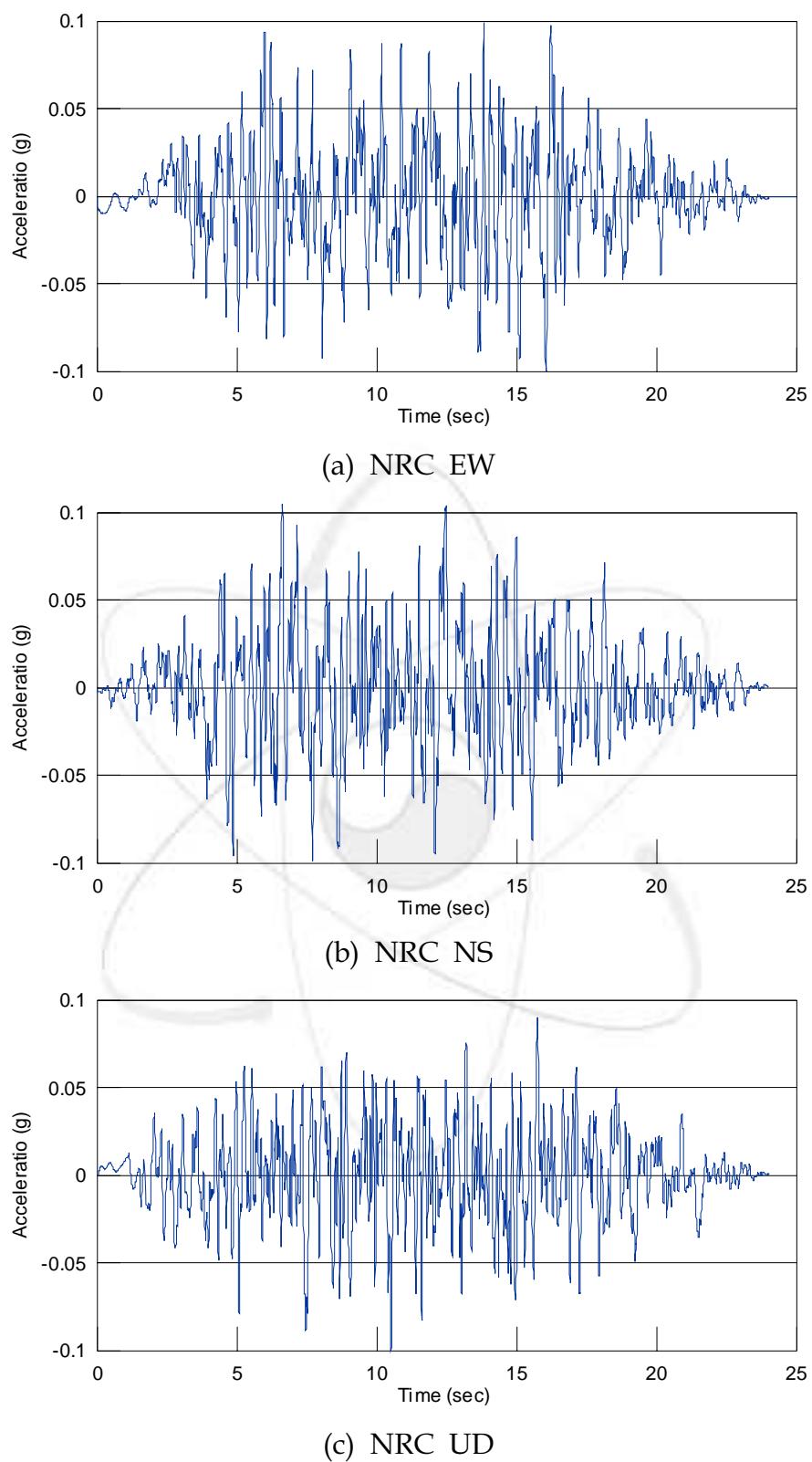


그림 2.8 입력지진의 가속도 시간이력 (NRC)

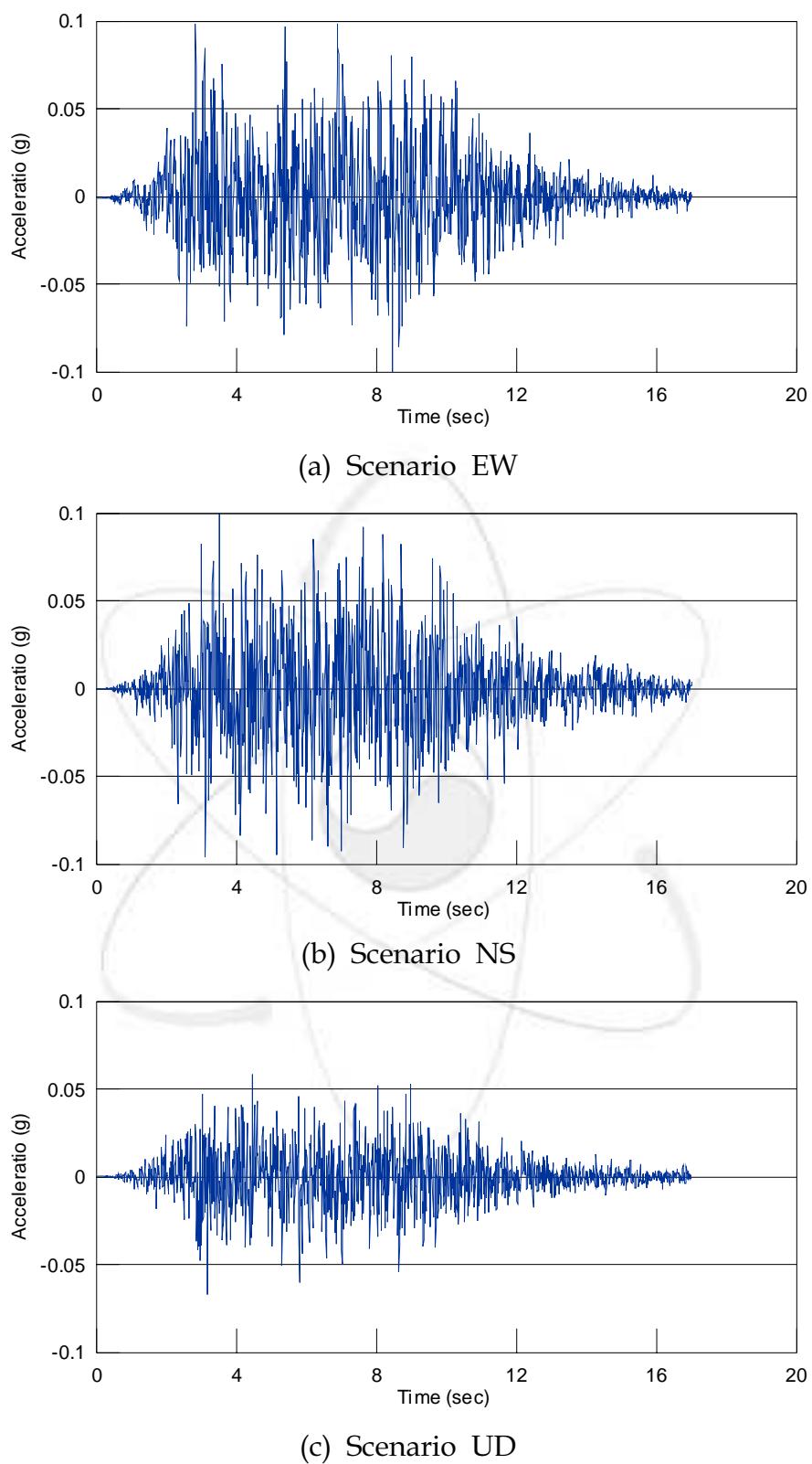


그림 2.9 입력지진의 가속도 시간이력 (Scenario)

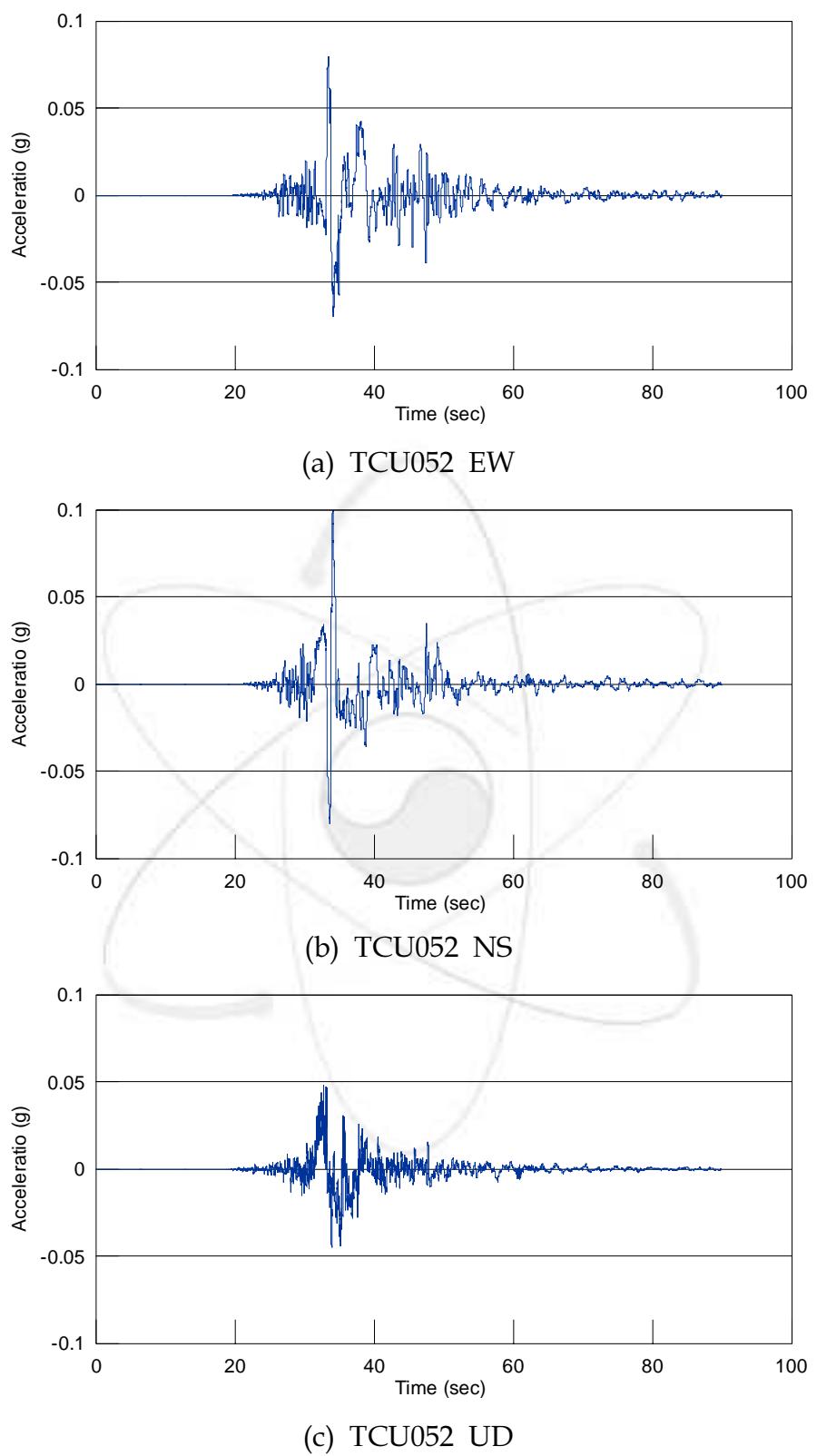
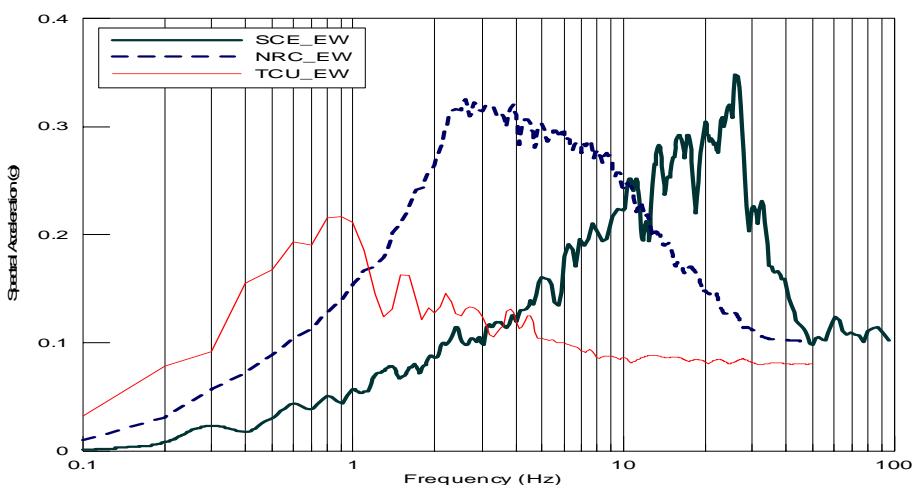
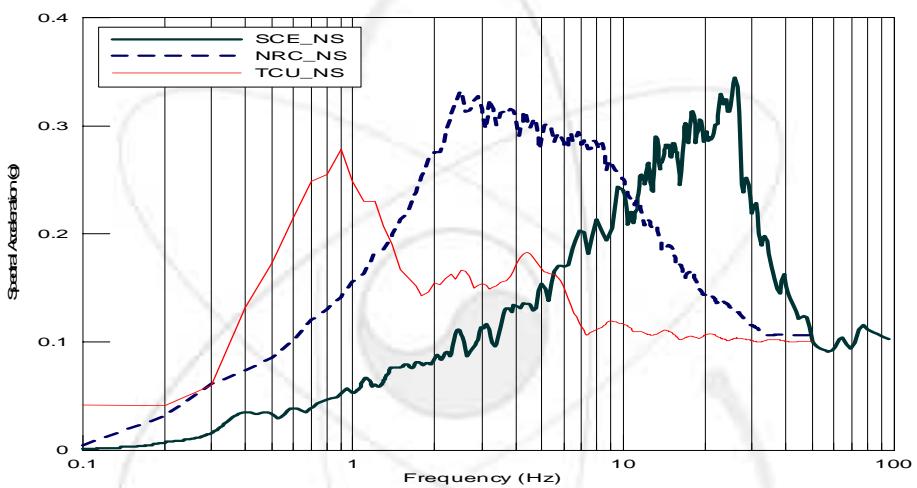


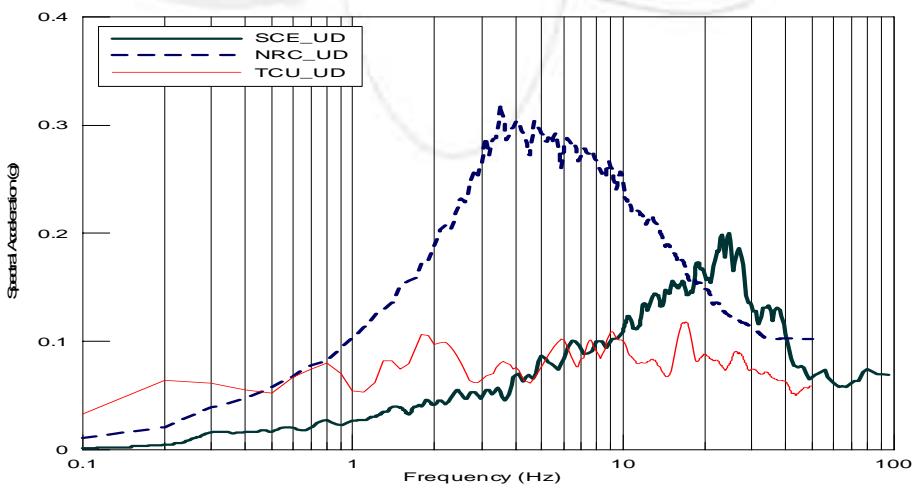
그림 2.10 입력지진의 가속도 시간이력 (TCU052)



(a) EW



(b) NS



(c) UD

그림 2.11 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

## 제 4 절 면진장치의 설계

본 실험에서는 두종류의 고무베어링과 한종류의 마찰형 베어링을 선택하여 기기면진에 사용하였다. 고무베어링은 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB)과 고감쇠고무베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였으며, 마찰형 베어링으로는 마찰진자형베어링(Friction Pendulum System: FPS)를 선택하였다. 각각의 설계과정에 대해서는 다음에 설명하였다.

### 1. NRB와 HDRB

본 실험에서 사용한 고무베어링은 NRB와 HDRB로서 실제로 가장 널리 사용하는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 사용하지 않은 것은 기기면진의 경우 구조물의 면진과는 달리 상부하중이 상대적으로 작으므로 인하여 LRB를 사용할 경우 효과적인 면진장치로서의 거동을 기대하기 어렵다는 판단에 기인한 것이다. NRB는 면진장치로서 널리 사용되었으나 감쇠효과가 거의 없으므로 최근에는 별로 사용되지 않는 면진장치이며 HDRB는 감쇠특성이 뛰어난 고무를 이용하여 제작하여 LRB와 같은 감쇠특성을 얻고자 하는 면진장치로서 최근 들어 사용이 증가하고 있는 면진장치이다. 고감쇠고무를 이용한 면진장치에 대한 연구는 국내에서는 거의 수행된 바가 없으나 외국의 경우 이에 대한 실험적, 해석적 연구가 다양하게 수행되고 있는 실정이다.

본 실험에서는 NRB와 HDRB의 설계를 위하여 상부하중에 따른 목표주파수를 결정하였다. 전술한 바와 같이 본 연구는 소형 기기를 대상으로 하였으므로 상부의 중량이 400kg이다. 이와 같은 경우 고무베어링의 단면이 커지면 횡방향 강성이 증대하므로 면진효과가 전혀 발생하지 않는 단점이 있다. 따라서 제작가능한 고무베어링중에 가장 작은 단면을 선택하여 2.3Hz의 주파수를 가지도록 설계하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. 본 실험에 사용된 NRB의 설계도면은 그

그림 2.12에 제시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 외경이 50mm이고 내경이 30mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였다. 설계에 따라 제작된 면진장치는 그림 2.13에서 제시한 바와 같다. NRB와 HDRB는 고무만 다른 종류를 사용하였으며 동일한 형상으로 제작하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고무 한 층의 높이는 8mm이며 5층의 고무가 사용되었으므로 전체 고무높이는 40mm이다. 이러한 형상은 일반적이지는 않으나 실험의 목적에 부합하도록 제작한 것이다. 따라서 이러한 비정상적인 형상계수로 인한 영향이 실험결과에서 나타날 수 있음을 예상할 수 있다. 면진장치는 기기의 장착이 용이하도록 4개를 강판에 부착하여 하나의 시스템으로 설치할 수 있도록 하였으며 이와 같이 결합된 형태는 그림 2.13(b)에서 제시하고 있다.

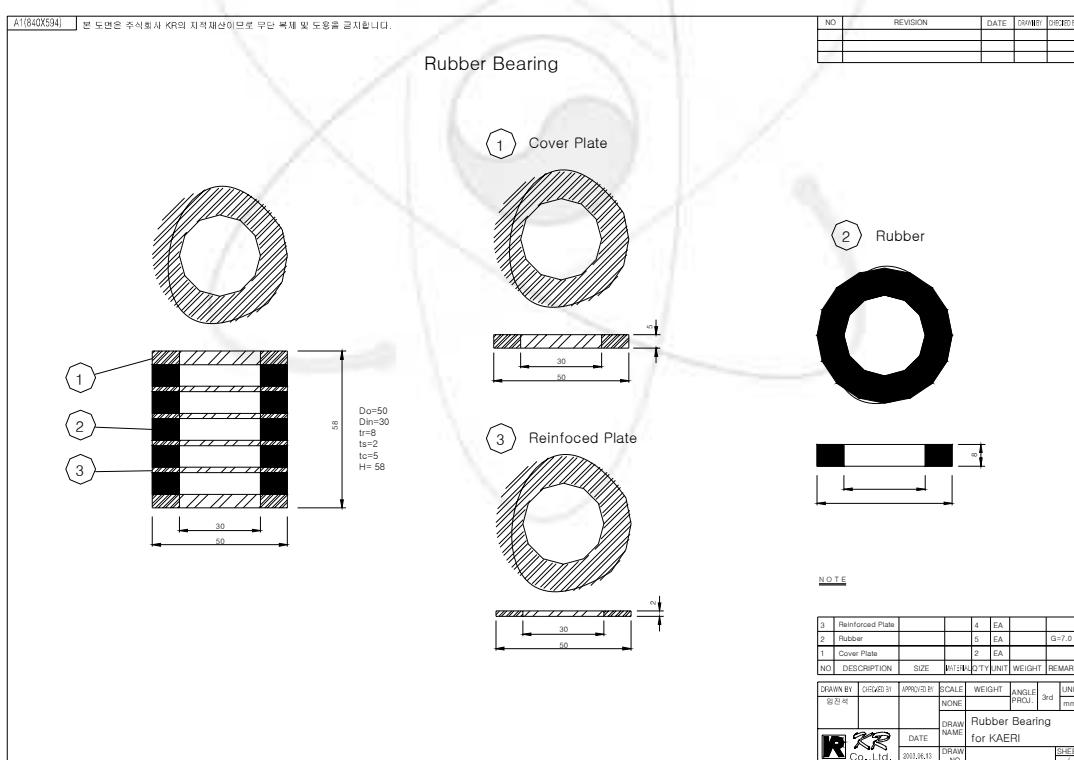


그림 2.12 NRB와 HDRB의 제작도면



(a) 제작된 고무베어링



(b) 실험에 사용하기 위해 결합한 형상

그림 2.13 실험에 사용한 고무베어링

## 2. FPS

본 실험에 적합한 FPS의 고유주파수는 1Hz로 결정하였다. 이것은 고무계 베어링과 고유진동수에서 너무 큰 차이가 발생하면 비교에 어려움이 있을 것으로 판단하여 결정한 것이다. 따라서 다음 식 (2.1)과 식 (2.2)에 의하여 FPS 마찰면의 곡률반경은 24.8cm로, 수평강성은  $4.02 \text{ kgf/cm}^2$ 로 결정하였다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2.1)$$

$$K = W/R \quad (2.2)$$

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 주목할 것은 제작된 FPS 마찰면의 곡률반경이 다른 연구에서 사용한 것에 비하여 상대적으로 작다는 것이다. FPS의 곡률반경이 작을 경우 마찰력에 의해서만 면진효과가 발휘되는 것이 아니고 곡면에 의한 수평분력이 크게 작용하므로 또 다른 결과를 유추할 수도 있을 것으로 판단된다. 제작을 위한 도면은 그림 2.14에 제시하였고 제작된 형상은 그림 2.15와 같다. FPS도 고무베어링과 동일하게 철판에 4개의 FPS를 결합하여 기기모형에 설치할 때 용이하도록 하였다. 결합된 그림은 그림 2.15(b)에서 제시하고 있다.

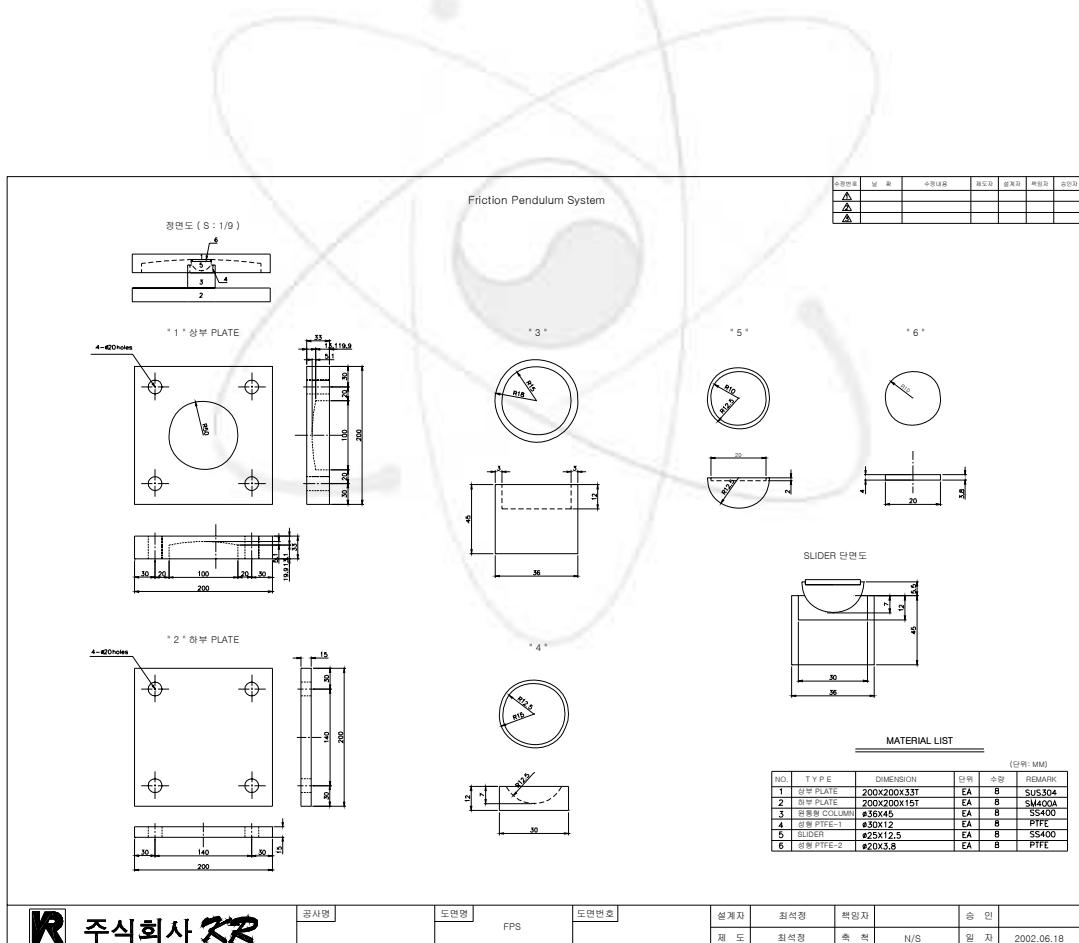


그림 2.14 FPS 제작도면



(a) 제작된 FPS 형상



(b) 실험에 사용하기 위해 결합된 형상

그림 2.15 실험에 사용한 FPS



## 제 3 장 면진장치 특성시험

### 제 1 절 개 요

선정된 면진장치의 특성시험을 위하여 수평방향과 수직방향 모두 10ton 용량의 유압가력기(actuator)를 설치하여 그림 3.1과 같은 성능시험장치를 제작하였다. 성능시험장치에 면진장치별로 각각 4개씩을 이용하여 하나의 시험체로 제작하여 실험을 수행하였다. 따라서 면진장치 하나를 이용해서 특성시험을 수행한 것에 비하여 실제의 거동을 유추할 수 있고 실제상황을 더 잘 반영한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. Jig plate에 면진장치가 설치된 사진은 그림 3.2와 같다. 수직하중과 수평하중은 가력기에 설치된 계측기를 이용하여 측정하였고, 수평변위와 수직변위는 각각 변위계를 이용하여 계측하였다.





그림 3.1 특성시험장치



그림 3.2 특성시험장치에 설치된 고무베어링

## 제 2 절 실험방법

### 1. NRB와 HDRB

#### 가. 수평방향 가진 시험

동일한 형상으로 제작된 NRB와 HDRB의 수평전단시험에 의한 기계적 특성평가를 수행하기 위하여 전술한 바와 같은 특성시험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 특성시험은 0.1Hz의 동일한 주파수를 가지는 정현파를 이용하였으며 최대변위를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 최대변위는 10mm, 20mm, 40mm 그리고 55mm로 증가시키면서 각각 10회씩 반복하여 실험을 수행하였다. 면진장치의 순고무높이가 40mm 이므로 더 큰 변위에 대한 실험을 수행할 수도 있으나 워낙 소규모의 고무베어링이므로 이와 같이 결정하였다. 실험에 사용한 하중의 수평방향 변위-시간이력은 그림 3.3에 도시하였다. 그림과 같이 NRB와 HDRB에 대하여 각각 400초 동안의 가진에 의하여 면진장치의 기계적 특성을 평가하도록 하였다.

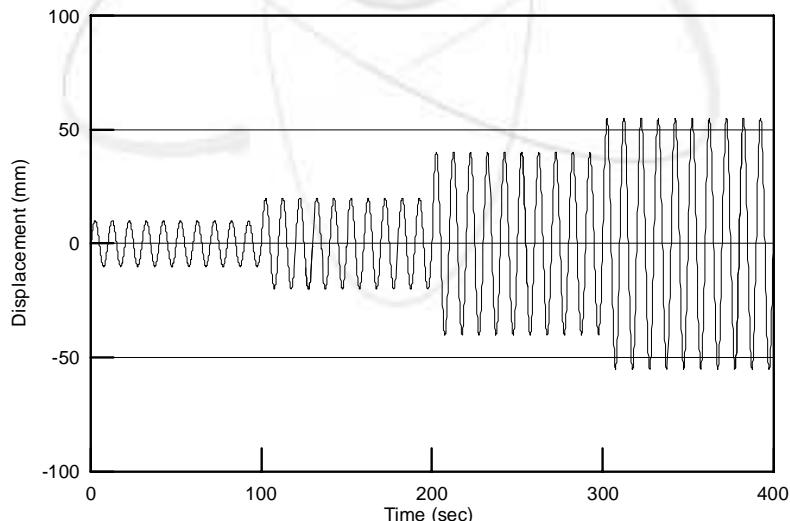


그림 3.3 특성시험을 위한 수평하중의 변위-시간이력 (NRB와 HDRB)

## 나. 연직방향 가진 시험

선정된 고무베어링은 연직방향 하중에 대한 특성시험을 수행하여 연직강성을 비교해 보았다. 연직방향 특성시험은 일본면진구조협회가 발간한 면진부재 JSSI규격[18]의 기준에 따라 실험을 수행하였다. 기준에 따르면 연직방향 특성시험의 경우는 연직하중이 없는 상태에서부터 설계하중보다 30% 증가한 하중까지 서서히 증가시킨 후에 설계하중의  $\pm 30\%$  범위의 하중을 3cycle 반복재하함으로서 연직강성을 측정하도록 하고 있다. 따라서 본 시험체의 경우는 설계하중이 400kg 이므로 520kg에서 380kg까지 3회 반복재하하여 실험을 수행하였다.

## 2. FPS

FPS의 경우는 고무베어링과는 달리 가진주파수에 의하여 면진장치의 기계적특성이 변화하는 것이 아니고 가진 속도에 의하여 달라지므로 가진속도를 일정하게 한 상태에서의 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용한 FPS는 마찰면의 반경이 50mm로 설계되었으나 마찰재의 반경을 고려하여 최대변위를 30mm까지 적용하여 시험을 수행하였다. 가진속도를 2mm/sec, 4mm/sec, 20mm/sec, 40mm/sec 그리고 80mm/sec으로 변화하면서 시험을 수행하였다. 각 실험경우별로 실험방법은 다음의 표 3.1에 정리하였다. 표에서 case 4의 경우 변위를 변화시키면서 속도를 가장 크게 하여 실험을 한 것은 실험장치의 특성상 가진속도가 증가하면 일정한 수직하중을 유지하는 것이 어렵기 때문에 FPS의 손상이 발생할 것을 우려하여 실험순서를 결정하였기 때문이다.

표 3.1 FPS의 특성시험 방법

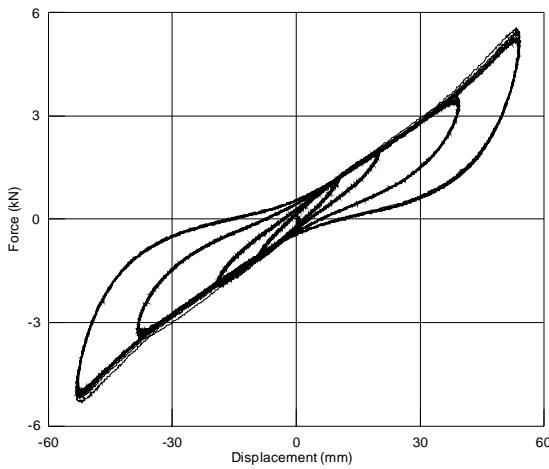
시험경우	변위 (mm)	주파수(Hz)	주기(초)	속도(mm/sec)	Cycle
Case 1	10	0.05	20	2	5
		0.1	10	4	10
		0.5	2	20	10
		1	1	40	10
Case 2	20	0.025	40	2	5
		0.05	20	4	5
		0.25	4	20	10
		0.5	2	40	10
Case 3	30	0.0167	60	2	5
		0.033	30	4	5
		0.167	6	20	10
		0.333	3	40	10
Case 4	10	2	0.5	80	10
	20	1	1	80	10
	30	0.667	1.5	80	10

## 제 3 절 실험결과

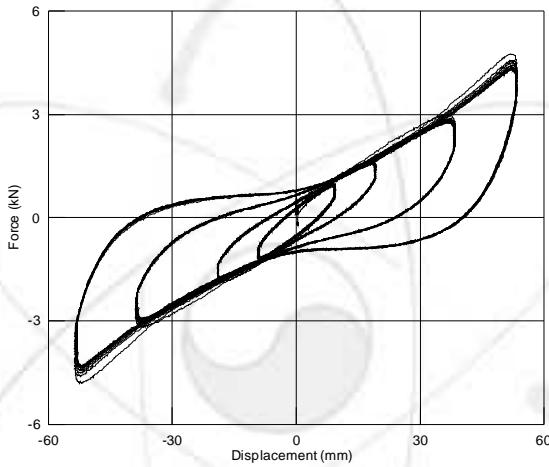
### 1. NRB와 HDRB

#### 가. 수평방향 가진 시험

NRB와 HDRB의 수평방향 특성시험으로부터 얻은 하중-변위 관계를 그림 3.4에 각각 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 동일형상의 면진장치에서 고무의 감쇠특성이 달라졌을 때 수평하중에 대한 하중-변위 이력곡선이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 우선 면진장치 순고무높이가 40mm 임에도 수평변위가 40mm에 도달했을 때 경화현상이 시작되는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 고무계 베어링이 200%변형에서 경화현상이 발생하는 것과 비교하면 적은 변형만을 허용하는 결과이며, 제작된 면진장치가 매우 소형이므로 발생하는 결과인 것으로 판단된다. 또한 이력곡선의 면적이 HDRB가 상당이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 큰 감쇠값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 변위가 커짐에 따라서 NRB와 HDRB의 차이가 감소하는 것을 알 수 있지만 적은 변형에서는 감쇠값이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 변형이 적게 발생하는 경우에 HDRB의 고감쇠특성이 더 크게 평가될 수 있다는 것을 의미한다. 또한 HDRB는 NRB에 비하여 초기강성이 미소하나마 크게 평가되는 반면 2차강성은 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 저중량 기기에 적용하기에 적합한 것으로 판단된다.



(a) NRB



(b) HDRB

그림 3.4 고무베어링의 수평전단시험에 의한 하중-변위 곡선

또한 그림에서 보는 바와 같이 변위가 증가할수록 면진장치의 특성시험 결과가 기존의 면진장치 특성시험에서 나타났던 하중-변위 이력곡선과는 다른 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 변형률이 100%정도인 경우부터는 하중의 증가없이 변위가 증가함으로써 경화현상과 같은 유사한 모양을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 제작된 고무베어링의 형상이 일반적인 고무베어링과는 다른 모습을 보이기 때문이며 그에 의해서 전단변형이 아닌 흠변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

고무베어링의 거동특성을 결정짓는 형상계수는 고무 한 층의 높이 및 전체층의 높이 그리고 하중을 받는 면적에 의하여 결정된다. 본 연구에서

사용한 것과 같은 중공형 고무베어링의 경우 한층의 고무를 그림 3.5와 같이 나타낼 수 있다.

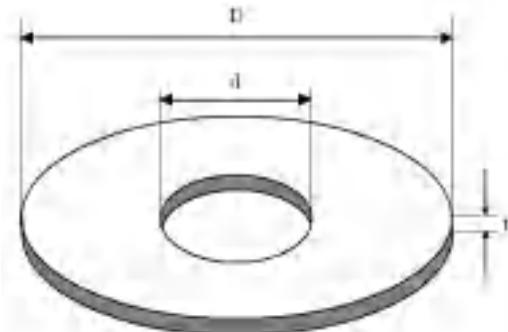


그림 3.5 적층 고무

그림에서 D는 고무의 외경을 나타내고 d는 내경, 그리고 t는 고무 한층의 두께를 나타내고 있다. 이러한 경우 고무베어링의 1, 2차 형상계수인  $S_1$ 과  $S_2$ 는 식 (2.3)과 식 (2.4)와 같이 표현된다.

$$S_1 = \frac{D-d}{4 \cdot t} \quad (2.3)$$

$$S_2 = \frac{D-d}{n \cdot t} \quad (2.4)$$

일반적으로 1차 형상계수는 20-35의 값을 갖는 것이 좋고, 2차형상계수는 5이상의 값을 갖는 것이 효과적인 전단변형을 하는데 유리한 것으로 알려져 있다[19]. 그러나 본 연구에서 사용한 고무베어링의 경우 웃식에 적용하여 각각의 형상계수를 구해보면 각각 0.65 와 0.5의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 인해서 변형률이 증가할 경우 전단변형이 아닌 휨변형이 발생하여 그림 3.4와 같은 이력곡선으로 나타나게 된 것이다. 실제로 실험시 55mm의 변위가 발생했을때의 모습은 그림 3.6에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고무베어링의 휨거동이 발생하는 것을 명확하게 알 수 있다.



그림 3.6 수평전단 시험시 고무베어링의 흡거동

면진장치 특성시험에 의한 NRB와 HDRB의 감쇠비를 다음의 표 3.2에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 최대변위가 증가함에 따라 감쇠비가 같이 증가하는 것을 알 수 있고, 고무의 특성에 의하여 HDRB의 감쇠비가 매우 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 변위가 커짐에 따라 NRB의 감쇠비가 상대적으로 더 많이 증가하므로 HDRB와 NRB의 감쇠비의 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 이것은 고무의 특성에 의한 것이라기 보다는 면진장치가 흡변형을 일으킴에 기인한 것으로 판단된다.

표 3.2 NRB와 HDRB의 감쇠비 변화

변위(mm)		10	20	40	55
감쇠비 (%)	NRB	2.2	9.2	10.5	10.9
	HDRB	14.8	19.0	22.3	20.6

#### 나. 연직방향 특성시험

다음으로 고무베어링의 연직하중에 따른 실험을 실시하여 연직강성을 평가하였다. 실험결과는 그림 3.7에 도시하였다. 전술한 실험방법에 의해

수직하중을 2.8kN에서 5.2kN까지 변화시키면서 3회 반복한 실험결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일 하중에 대해서 HDRB가 더 큰 변위가 발생하므로 수직강성 역시 HDRB가 NRB에 비하여 상대적으로 적게 평가되는 것을 알 수 있다. 이것은 면진장치로서의 약점으로 평가될 수도 있지만 대상으로 하는 기기가 저중량이므로 기기면진시는 큰 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다. 이력곡선에 잡음이 많이 들어간 것은 발생하는 변위가 매우 작음으로 인해 발생한 것이나 전체적인 거동을 판단하는 데는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

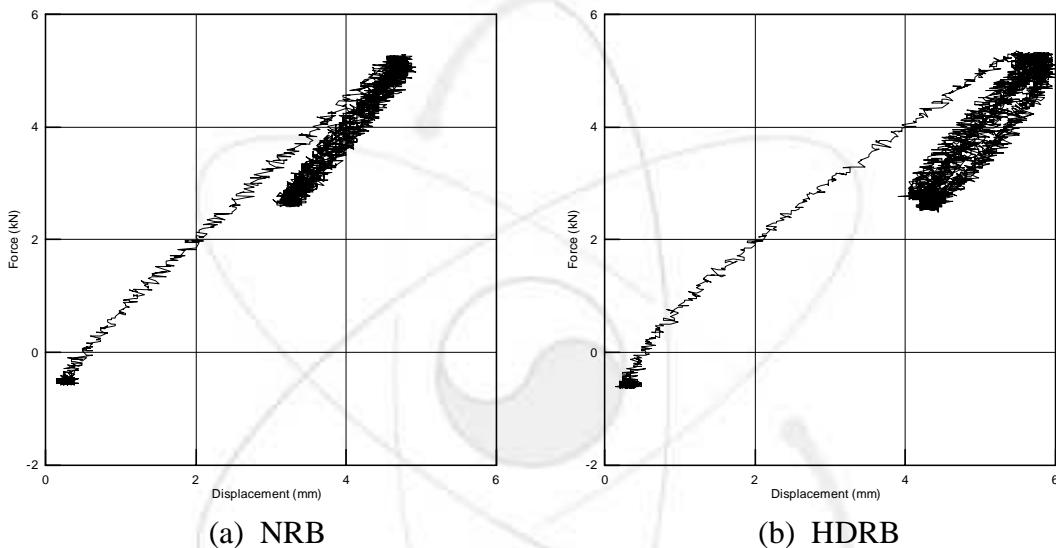


그림 3.7 고무베어링의 수직하중에 의한 하중-변위 곡선

## 2. FPS

표 3.1에서 제시한 바와 같은 방법에 의하여 4가지 경우에 대한 FPS 특성시험을 수행하였다. 각 case에 따른 FPS의 하중-변위 이력곡선은 그림 3.8에 모두 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각 경우별로 속도가 증가함에 따라 이력곡선의 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 3.8(a)의 경우는 최대변위를 10mm로 고정하고 속도를 증가시키면서 실험을 수행한 것으로 일반적인 FPS의 특성시험결과와 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 그림 3.8(b)부터는 변위가 증가함에 따라 수평하중이 급격하게

증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 속도가 작거나 변위가 작을 경우에는 발생하지 않지만 변위가 20mm이상이고 속도가 20mm/sec가 넘어설 경우 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 것은 두가지 원인에 기인한 것으로 볼 수 있다. 첫 번째는 본 실험에서 사용한 FPS는 일반 구조물에 사용하는 것과 달리 마찰면의 곡률반경이 24.8cm로서 매우 작은 곡률을 가진다. 따라서 변위가 증가할 경우 마찰면에서의 횡방향 분력이 크게 증가하므로 마찰만에 의한 저항력에 비하여 수평하중이 크게 평가되는 것이다. 이러한 부분은 FPS 마찰면의 곡률과 실제 거동과의 상관관계에 대한 추후 연구가 필요한 것으로 판단된다. 두 번째 이유로 본 실험에서는 상재하중을 400kg으로 결정하여 실험을 수행하였는데 사용한 유압 가력기가 속도가 증가할 경우 일정한 수직하중으로 유지시켜주는 것이 기계적으로 불가능하기 때문에 속도가 빨라지고 변위가 증가할때는 수평하중이 더 크게 평가되는 것이다. 이러한 특징은 그림 3.8(d)의 경우 가장 명확하게 볼 수 있다. 그림 3.8(d)의 경우는 속도를 80mm/sec으로 고정하고 변위를 10mm, 20mm, 그리고 30mm로 증가시키면서 실험을 수행한 경우이다. 따라서 일반적인 실험에서 볼 수 없는 하중-변위 곡선이 나타나게 된 것으로 판단된다. 따라서 곡률이 작은 FPS의 설계와 해석에 있어서는 이러한 영향을 고려하여야 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

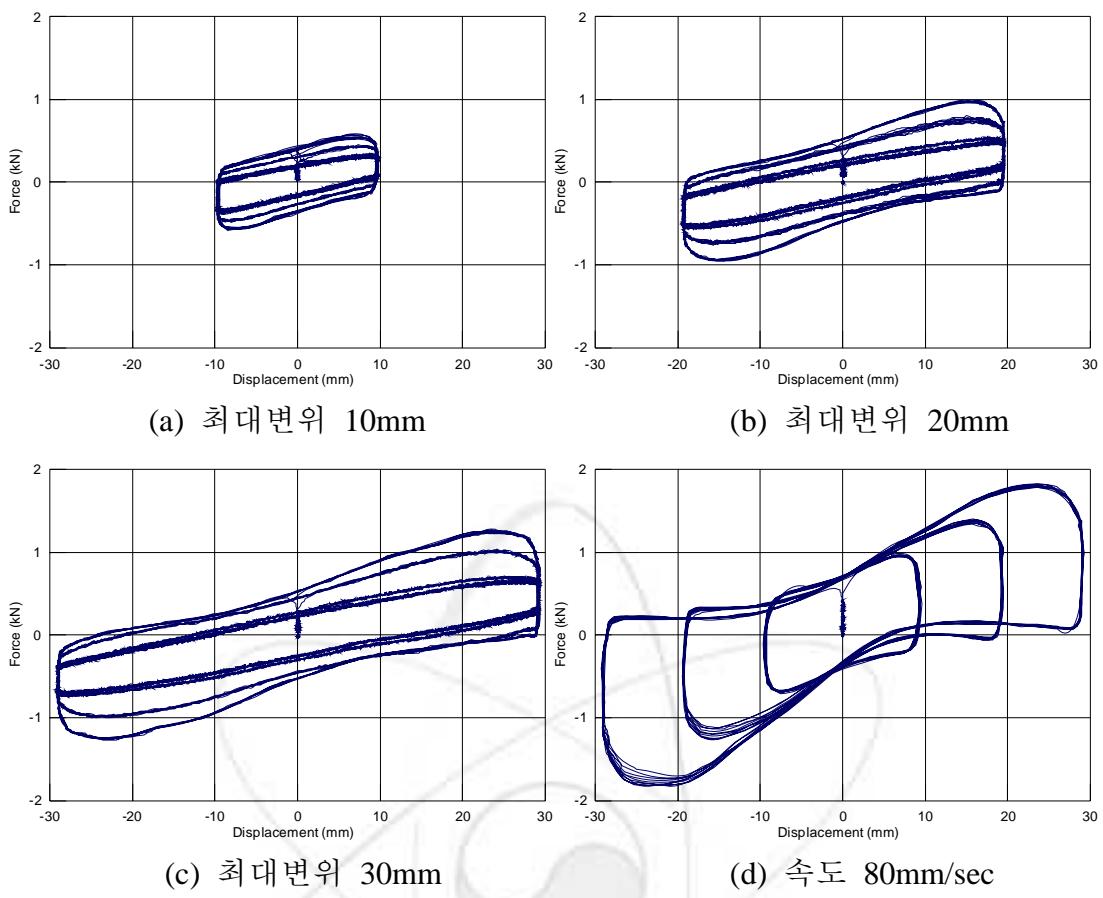


그림 3.8 FPS의 하중-변위이력

## 제 4 장 진동대 실험결과 및 분석

### 제 1 절 개요

본 장에서는 본 연구에서 수행한 3종류의 구조물에 대한 진동대 실험의 결과를 정리하여 비교 분석하였다. 각 구조물별로 1차원, 2차원 그리고 3차원 가진을 수행하여 그 결과를 비교하였으며, PGA에 따른 차이를 분석하기 위하여 PGA를 달리하여 실험을 수행하였다. 3-4회의 실험을 수행한 후에는 전체 시스템의 손상여부를 검토하기 위하여 랜덤진동에 의한 Modal 실험을 수행하였다. 각 구조물별로 수행한 실험의 순서는 다음의 표 4.1~4.3에 정리하였다.

표에서 보는 바와 같이 격납건물 모형이 4층 구조물의 경우는 전체 37회, 보조건물 모형인 2층 구조물은 23회 그리고 고층건물 모형인 6층 구조물의 경우 25회의 가진실험을 수행하였다. 전체의 가진횟수가 많아진 것은 본 실험에서는 주로 PGA, 가진 방법(1-D, 2-D, 3-D) 및 지진파특성에 의한 영향을 살펴보고자 하였기 때문이다. 특별히 2방향 가진의 경우는 수평직교방향의 2방향 성분을 고려한 것이 아니고 수평방향성분 한가지와 수직방향 진동성분을 고려함으로서 수직진동시 면진장치의 거동을 알아보고자 하였다. 그러나 표 4.1에 제시한 바와 같이 4층 구조물의 경우는 2차원 가진시 수평직교방향의 2방향 성분을 고려한 실험을 수행하였다.

실험결과는 기본적으로 PGA를 중심으로 살펴보았다. 따라서 실제 진동대에 입력된 지진동의 PGA와 기기 및 각 층에서 계측된 PGA의 비교를 수행하였다. 실험에 사용하는 진동대는 표에서 제시한 바와 같이 목표 PGA와 지진파를 정하고 있지만 그것을 그대로 구현하는 것은 기계적인 특성상 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 입력지진의 PGA와 면진된 기기의 PGA를 비교하여 지진응답비로 표시하여 분석을 수행하였다. 마지막으로 입력진동과 면진기기에서의 응답에 대한 응답스펙트럼 분석을 통하여 주파수에 따른 면진효과를 비교하였다.

표 4.1 4층 구조물의 실험순서

	지진파	PGA	Remark
1	Modal Test 1		Frequency Check
2	Scenario	0.1g	1-D input
3	Scenario	0.1g	2-D input (2H)
4	Scenario	0.1g	3-D input (2H & V)
5	Modal Test 2		Frequency Check
6	TCU052	0.1g	1-D input
7	TCU052	0.1g	2-D input (2H)
8	TCU052	0.1g	3-D input (2H & V)
9	Modal Test 3		Frequency Check
10	NRC	0.1g	1-D input
11	NRC	0.1g	2-D input (2H)
12	NRC	0.1g	3-D input (2H & V)
13	Modal Test 4		Frequency Check
14	Scenario	0.2g	1-D input
15	Scenario	0.2g	2-D input (2H)
16	Scenario	0.2g	3-D input (2H & V)
17	Modal Test 5		Frequency Check
18	TCU052	0.2g	1-D input
19	TCU052	0.2g	2-D input (2H)
20	TCU052	0.2g	3-D input (2H & V)
21	Modal Test 6		Frequency Check
22	NRC	0.2g	1-D input
23	NRC	0.2g	2-D input (2H)
24	NRC	0.2g	3-D input (2H & V)
25	Modal Test 7		Frequency Check
26	Scenario	0.25g	1-D input
27	Scenario	0.25g	2-D input (2H)
28	Scenario	0.25g	3-D input (2H & V)
29	Modal Test 8		Frequency Check
30	TCU052	0.25g	1-D input
31	TCU052	0.25g	2-D input (2H)
32	TCU052	0.25g	3-D input (2H & V)
33	Modal Test 9		Frequency Check
34	NRC	0.25g	1-D input
35	NRC	0.25g	2-D input (2H)
36	NRC	0.25g	3-D input (2H & V)
37	Modal Test 10		Frequency Check

표 4.2 2층 구조물의 실험순서

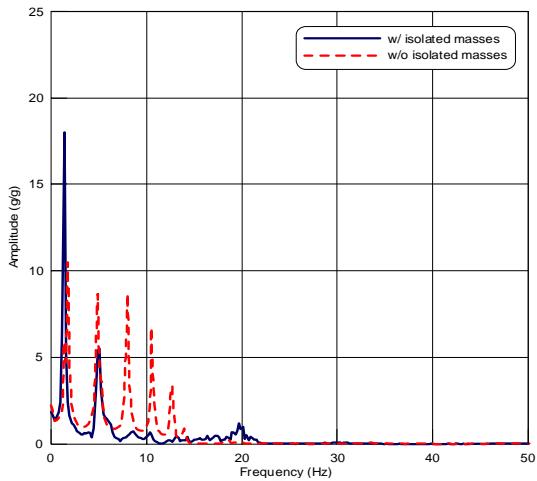
	지진파	PGA	Remark
1	Modal Test 1		Frequency Check
2	TCU052	0.1g	1-D input
3	NRC	0.1g	1-D input
4	Scenario	0.1g	1-D input
5	Modal Test 2		Frequency Check
6	TCU052	0.1g	2-D input (1H & V)
7	TCU052	0.1g	3-D input (2H & V)
8	NRC	0.1g	2-D input (1H & V)
9	NRC	0.1g	3-D input (2H & V)
10	Scenario	0.1g	2-D input (1H & V)
11	Scenario	0.1g	3-D input (2H & V)
12	Modal Test 3		Frequency Check
13	TCU052	0.2g	1-D input
14	NRC	0.2g	1-D input
15	Scenario	0.2g	1-D input
16	Modal Test 4		Frequency Check
17	TCU052	0.2g	2-D input (1H & V)
18	TCU052	0.2g	3-D input (2H & V)
19	NRC	0.2g	2-D input (1H & V)
20	NRC	0.2g	3-D input (2H & V)
21	Scenario	0.2g	2-D input (1H & V)
22	Scenario	0.2g	3-D input (2H & V)
23	Modal Test 5		Frequency Check

표 4.3 6층 구조물의 실험순서

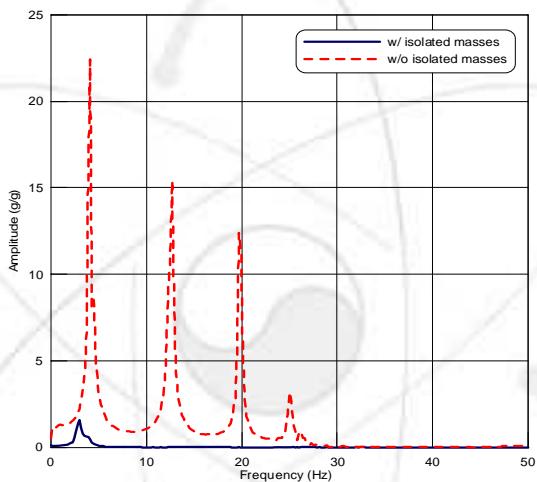
	지진파	PGA	Remark
1	Modal Test 1		Frequency Check
2	Scenario	0.05g	1-D input
3	Scenario	0.05g	2-D input (1H & V)
4	Scenario	0.05g	3-D input (2H & V)
5	Modal Test 2		Frequency Check
10	NRC	0.05g	1-D input
11	NRC	0.05g	2-D input (1H & V)
12	NRC	0.05g	3-D input (2H & V)
9	Modal Test 3		Frequency Check
10	TCU052	0.05g	1-D input
11	TCU052	0.05g	2-D input (1H & V)
12	TCU052	0.05g	3-D input (2H & V)
13	Modal Test 4		Frequency Check
14	Scenario	0.1g	1-D input
15	Scenario	0.1g	2-D input (1H & V)
16	Scenario	0.1g	3-D input (2H & V)
17	Modal Test 5		Frequency Check
18	NRC	0.1g	1-D input
19	NRC	0.1g	2-D input (1H & V)
20	NRC	0.1g	3-D input (2H & V)
21	Modal Test 6		Frequency Check
22	TCU052	0.1g	1-D input
23	TCU052	0.1g	2-D input (1H & V)
24	TCU052	0.1g	3-D input (2H & V)
25	Modal Test 7		Frequency Check

## 제 2 절 랜덤진동시험에 대한 구조물 동특성 추정

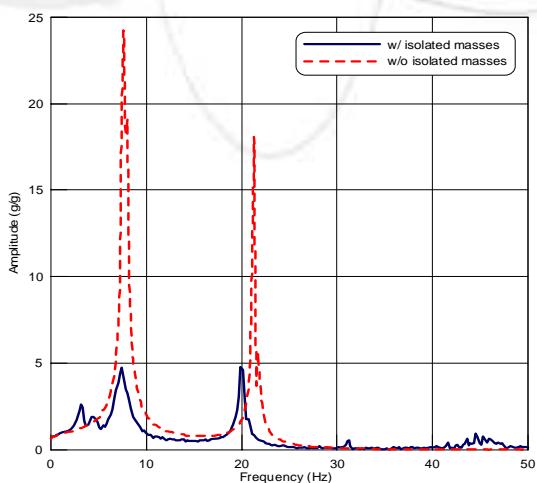
전술한 바와 같이 진동대실험의 중간에 랜덤진동을 이용한 Modal 실험을 수행하였다. 자유진동을 이용한 실험을 수행하는 이유는 실험의 중간에 구조물 전체의 고유진동수를 평가함으로서 시스템의 손상여부를 알아보기 위해 하였기 때문이다. 자유진동실험은 면진기기가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우에 대해서 모두 수행함으로서 기기설치에 따른 시스템의 변화를 살펴보고자 하였다. 실험결과는 기기가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우를 비교하여 구조물별로 다음의 그림 4.1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면진기기가 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 4.1(a)에서 보는 바와 같이 6층구조물의 경우는 1차, 2차 모드의 경우는 고유주파수에는 차이가 없으나 면진기기가 설치됨에 따라 1차모드의 기여도가 크게 증가하여 3차모드부터 불분명해지는 것을 알 수 있다. 그림 4.1(b)에서 보는 것과 같이 4층구조물의 경우는 면진기기가 설치되었을 때 1차모드를 제외하고는 대부분의 모드가 사라지는 것을 알 수 있으면 특별히 다른 구조물과는 다르게 1차모드의 고유주파수가 면진기기의 설치로 인하여 상당부분 저주파 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그림 4.1(c)의 2층구조물의 경우는 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 제 1모드 고유진동수는 표 4.4에 정리하였다.



(a) 6층 구조물



(b) 4층 구조물

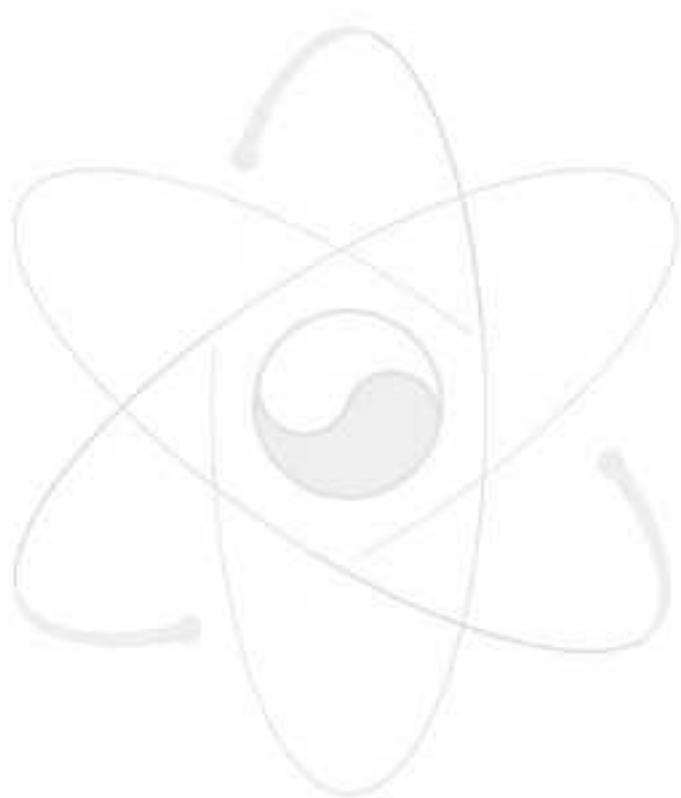


(c) 2층 구조물

그림 4.1 랜덤진동에 의한 실험결과

표 4.4 실험대상 구조물의 고유진동수 (단위:Hz)

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



### 제 3 절 격납건물 모형

격납건물을 대상으로 하여 선정한 4층 구조물에 대한 실험결과를 분석하였다. 전술한 바와 같이 PGA분석, 지진응답비 분석 그리고 응답스펙트럼 분석을 통한 비교검토를 수행하였다.

#### 1. PGA분석

먼저 목표로 설정한 PGA에 따라 실제로 진동대에 입력된 지진파의 PGA와 그에 따른 각 기기에서의 응답을 PGA만을 중심으로 정리하여 1층의 기기와 4층의 기기에 대하여 각각 표 4.5와 표 4.6에 정리하였다.

표 4.5 4층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g)

지진파	차원	Target PGA			Real PGA			1층 FPS			1층 NRB			1층 HDRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D	0.1	-	-	0.133	-	-	0.157	-	-	0.123	-	-	0.117	-	-
		0.2	-	-	0.322	-	-	0.232	-	-	0.177	-	-	0.198	-	-
		0.25	-	-	0.414	-	-	0.204	-	-	0.230	-	-	0.213	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.121	0.139	-	0.169	0.162	-	0.119	0.108	-	0.100	0.128	-
		0.2	0.2	-	0.326	0.302	-	0.167	0.165	-	0.174	0.199	-	0.181	0.155	-
		0.25	0.25	-	0.399	0.391	-	0.174	0.226	-	0.223	0.235	-	0.186	0.189	-
	3D	0.1	0.1	0.067	0.125	0.126	0.081	0.174	0.135	0.100	0.118	0.107	0.135	0.097	0.108	0.128
		0.2	0.2	0.134	0.311	0.305	0.215	0.164	0.181	0.255	0.178	0.194	0.338	0.173	0.148	0.293
		0.25	0.25	0.201	0.395	0.396	0.292	0.179	0.222	0.345	0.230	0.219	0.418	0.172	0.194	0.362
TCU052	1D	0.1	-	-	0.085	-	-	0.116	-	-	0.126	-	-	0.108	-	-
		0.2	-	-	0.158	-	-	0.876	-	-	0.233	-	-	0.185	-	-
		0.25	-	-	0.192	-	-	0.997	-	-	0.278	-	-	0.207	-	-
	2D	0.1	0.08	-	0.084	0.096	-	0.082	0.075	-	0.112	0.118	-	0.102	0.077	-
		0.2	0.16	-	0.187	0.109	-	1.257	0.849	-	0.233	0.176	-	0.182	0.140	-
		0.25	0.2	-	0.222	0.137	-	0.798	0.729	-	0.270	0.224	-	0.202	0.192	-
	3D	0.1	0.08	0.044	0.076	0.095	0.056	0.083	0.104	0.057	0.109	0.118	0.183	0.100	0.079	0.102
		0.2	0.16	0.088	0.159	0.115	0.103	1.124	0.624	0.360	0.229	0.178	0.204	0.179	0.141	0.158
		0.25	0.2	0.11	0.208	0.132	0.135	0.884	0.552	0.229	0.264	0.254	0.970	0.195	0.195	0.180
NRC	1D	0.1	-	-	0.132	-	-	0.143	-	-	0.266	-	-	0.191	-	-
		0.2	-	-	0.287	-	-	0.175	-	-	0.550	-	-	0.333	-	-
		0.25	-	-	0.331	-	-	0.274	-	-	0.605	-	-	0.391	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.127	0.203	-	0.142	0.169	-	0.252	0.257	-	0.182	0.197	-
		0.2	0.2	-	0.272	0.322	-	0.188	0.201	-	0.463	0.530	-	0.343	0.392	-
		0.25	0.25	-	0.323	0.378	-	0.298	0.292	-	0.616	0.722	-	0.441	0.476	-
	3D	0.1	0.1	0.1	0.134	0.187	0.122	0.154	0.153	0.133	0.265	0.258	0.377	0.184	0.204	0.262
		0.2	0.2	0.2	0.264	0.309	0.244	0.195	0.201	0.262	0.498	0.519	0.646	0.352	0.385	0.473
		0.25	0.25	0.25	0.314	0.376	0.312	0.321	0.306	0.340	0.630	0.755	0.815	0.450	0.468	0.550

표 4.6 4층 구조물 지진응답 (4층 기기, PGA:g)

지진파	차원	Real PGA			4층			4층 FPS			4층 NRB			4층 HDRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D	0.133	-	-	0.130	-	-	0.176	-	-	0.167	-	-	0.184	-	-
		0.322	-	-	0.352	-	-	0.164	-	-	0.251	-	-	0.275	-	-
		0.414	-	-	0.389	-	-	0.279	-	-	0.301	-	-	0.315	-	-
	2D	0.121	0.139	-	0.134	0.238	-	0.185	0.193	-	0.146	0.211	-	0.181	0.146	-
		0.326	0.302	-	0.373	0.372	-	0.181	0.167	-	0.265	0.335	-	0.250	0.267	-
		0.399	0.391	-	0.488	0.590	-	0.324	0.363	-	0.325	0.445	-	0.338	0.343	-
	3D	0.125	0.126	0.081	0.140	0.242	0.131	0.147	0.143	0.343	0.136	0.204	0.165	0.179	0.142	0.190
		0.311	0.305	0.215	0.413	0.543	0.339	0.288	0.270	0.922	0.250	0.342	0.351	0.248	0.264	0.410
		0.395	0.396	0.292	0.511	0.724	0.449	0.470	0.410	1.203	0.313	0.447	0.418	0.325	0.321	0.468
TCU052	1D	0.085	-	-	0.136	-	-	0.127	-	-	0.168	-	-	0.210	-	-
		0.158	-	-	0.202	-	-	0.213	-	-	0.346	-	-	0.298	-	-
		0.192	-	-	0.285	-	-	0.303	-	-	0.295	-	-	0.391	-	-
	2D	0.084	0.096	-	0.116	0.148	-	0.125	0.116	-	0.151	0.235	-	0.197	0.167	-
		0.187	0.109	-	0.626	0.634	-	0.989	0.630	-	0.266	0.362	-	0.333	0.292	-
		0.222	0.137	-	0.311	0.307	-	0.503	0.346	-	0.258	0.431	-	0.383	0.351	-
	3D	0.076	0.095	0.056	0.146	0.159	0.076	0.110	0.138	0.098	0.162	0.247	0.238	0.223	0.191	0.146
		0.159	0.115	0.103	0.693	0.575	0.133	0.905	0.584	0.552	0.232	0.360	0.252	0.305	0.292	0.221
		0.208	0.132	0.135	0.346	0.294	0.161	0.425	0.299	0.303	0.252	0.429	0.284	0.353	0.363	0.233
NRC	1D	0.132	-	-	0.210	-	-	0.139	-	-	0.319	-	-	0.340	-	-
		0.287	-	-	0.459	-	-	0.236	-	-	0.482	-	-	0.556	-	-
		0.331	-	-	0.663	-	-	0.398	-	-	0.570	-	-	0.716	-	-
	2D	0.127	0.203	-	0.227	0.390	-	0.162	0.180	-	0.292	0.518	-	0.615	0.353	-
		0.272	0.322	-	0.538	0.735	-	0.271	0.313	-	0.407	0.891	-	0.588	0.645	-
		0.323	0.378	-	0.653	0.863	-	0.402	0.432	-	0.534	0.827	-	0.719	0.691	-
	3D	0.134	0.187	0.122	0.229	0.381	0.141	0.180	0.176	0.185	0.295	0.520	0.376	0.313	0.358	0.298
		0.264	0.309	0.244	0.632	0.707	0.267	0.338	0.357	0.405	0.390	0.795	0.934	0.579	0.595	0.549
		0.314	0.376	0.312	0.683	0.791	0.322	0.381	0.436	0.511	0.561	0.801	1.039	0.697	0.666	0.745

표 4.6에서 보는 바와 같이 입력지진과 4층 구조물에서의 응답값을 비교해 보면 각 지진파별로 구조물의 고유진동수에 따라서 증폭이 다르게 나타나는 것을 확연히 알 수 있다. 랜덤진동에 의한 구조물의 응답에서 살펴본 바와 같이 기기가 설치되어 있는 4층 구조물의 고유진동수는 2.9Hz인 것으로 나타났다. 따라서 2~8Hz 대의 탁월주파수 성분을 가지고 있는 NRC의 경우 구조물에서의 증폭이 가장 크게 나타났고, 저주파 성분이 탁월한 TCU052의 경우도 구조물에서의 지진력 증폭이 발생했다. 그러나 Scenario의 경우는 20~30Hz 부분에서 탁월주파수 대역이 발생하고 저주파로 갈수록 그 입력이 급격히 감소하고 있으므로 오히려 지진력이 구조물에서 감소하는 것을 알 수 있다. 구조물에서의 이러한 응답의 차이는 면진기기에서의 응답의 차이로 반영되게 된다.

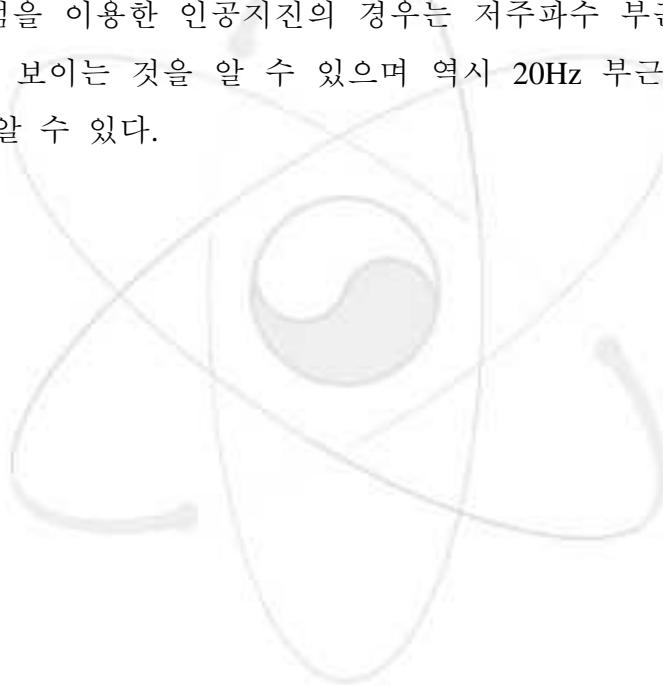
또한 표에서 보는 바와 같이 실제로 목표로 한 지진의 PGA를 진동대에

서 구현하는 일은 쉽지 않은 일이다. 또한 1방향 가진일 경우라 하더라도 본 실험에 사용한 진동대는 3방향 가력기를 장착하고 있기 때문에 완벽한 1방향 가진이 이루어지는 것은 불가능하다. 따라서 이러한 영향을 고려한 분석을 수행하는 것이 타당하다. PGA뿐만 아니라 실제 목표로 했던 지진 파형을 그대로 구현하는 것 또한 용이한 일은 아니다. 따라서 실험의 매 경우 각 지진파의 주파수 특성을 분석하여 기기응답을 분석하는 것이 타당성 있는 분석이 될 것이다. 4층 구조물에 대하여 목표로 했던 PGA와 실제 진동대에서 계측된 PGA를 비교하여 표 4.7에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 전체적으로 Scenario 지진과 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 강하여 탁월주파수 대가 1Hz 부근이므로 진동대가 모사하기에 어려움이 있었을 것으로 판단된다.

표 4.7 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 4.2에서 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 탁월주파수 대역이 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.



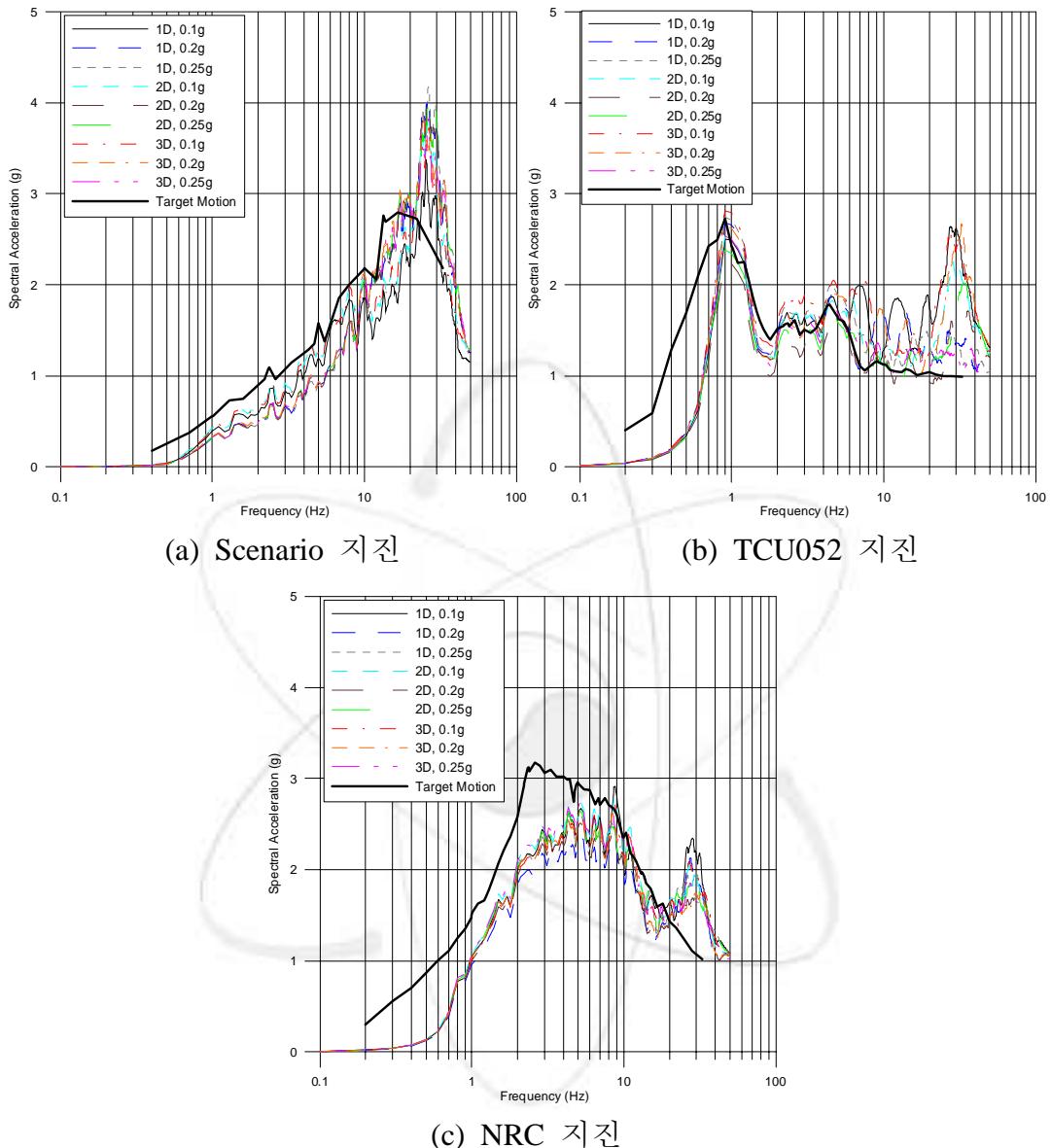
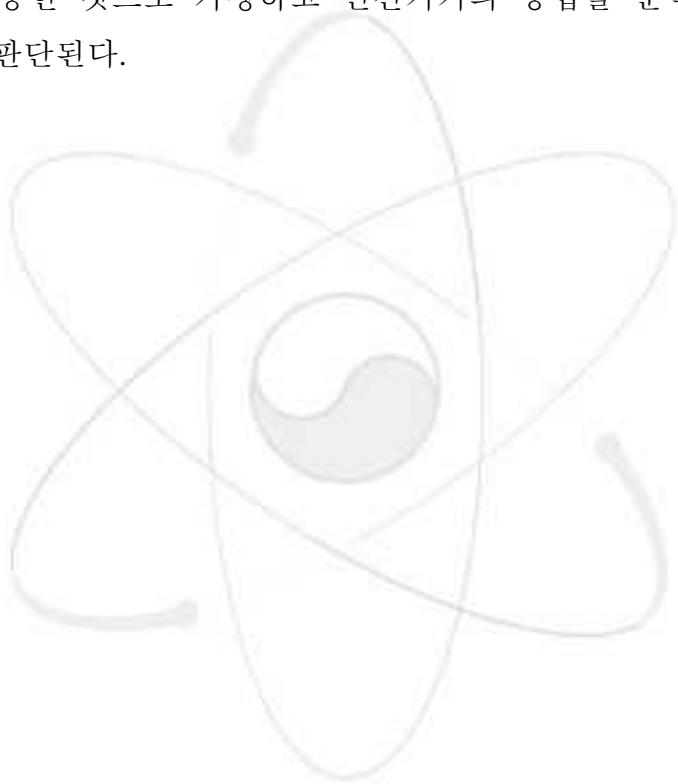


그림 4.2 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼 (4층 구조)

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. Scenario지진과 NRC지진의 경우는 비교적 지진파간의 편차가 적은 것으로 보이나 TCU052지진의 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 하더라고 매 실험에 따라 같은 지진파라고 볼 수는 없으며 모든 경우 다른 지진을 사용한 것으로 가정하고 면진기기의 응답을 분석하는 것이 타당할 것으로 판단된다.



## 2. 지진응답비 분석

1층 기기와 4층 기기에 대하여 층에서의 입력지진가속도와 기기에서의 응답가속도를 단순 비교하므로서 면진장치의 면진성능을 비교해 보았다. 지진응답비는 다음 식과 같이 정의되며 1층 기기와 4층 기기에 대하여 각 표 4.8~표 4.10에서 제시하였으며 전체적인 경향을 파악하기 위하여 각 진동대 실험 경우마다 1방향 가진에 대한 지진응답비를 그림 4.3~4.6에 도시하였다.

$$\text{지진응답비} = \frac{\text{기기응답 PGA}}{\text{Table PGA}}$$

표 4.8 4층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)

지진파	차원	1층 FPS			1층 NRB			1층 HDRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	1.19	-	-	0.93	-	-	0.88	-	-
	1D02	0.72	-	-	0.55	-	-	0.61	-	-
	1D025	0.49	-	-	0.55	-	-	0.52	-	-
	2D01	1.39	1.17	-	0.98	0.78	-	0.83	0.92	-
	2D02	0.51	0.55	-	0.54	0.66	-	0.56	0.51	-
	2D025	0.44	0.58	-	0.56	0.60	-	0.47	0.48	-
	3D01	1.40	1.07	1.23	0.94	0.84	1.66	0.78	0.85	1.58
	3D02	0.53	0.59	1.18	0.57	0.63	1.57	0.56	0.48	1.36
	3D025	0.45	0.56	1.18	0.58	0.55	1.43	0.43	0.49	1.24
TCU052	1D01	1.37	-	-	1.48	-	-	1.28	-	-
	1D02	5.56	-	-	1.48	-	-	1.18	-	-
	1D025	5.19	-	-	1.45	-	-	1.08	-	-
	2D01	0.98	0.79	-	1.33	1.23	-	1.22	0.80	-
	2D02	6.72	7.82	-	1.25	1.62	-	0.97	1.29	-
	2D025	3.60	5.30	-	1.22	1.63	-	0.91	1.40	-
	3D01	1.10	1.10	1.02	1.45	1.25	3.29	1.33	0.83	1.84
	3D02	7.07	5.43	3.49	1.44	1.54	1.97	1.13	1.23	1.53
	3D025	4.26	4.18	1.69	1.27	1.93	7.17	0.94	1.48	1.33
NRC	1D01	1.08	-	-	2.01	-	-	1.45	-	-
	1D02	0.61	-	-	1.92	-	-	1.16	-	-
	1D025	0.83	-	-	1.83	-	-	1.18	-	-
	2D01	1.13	0.83	-	1.99	1.26	-	1.44	0.97	-
	2D02	0.69	0.63	-	1.70	1.65	-	1.26	1.22	-
	2D025	0.92	0.77	-	1.91	1.91	-	1.37	1.26	-
	3D01	1.15	0.82	1.09	1.98	1.38	3.09	1.37	1.09	2.15
	3D02	0.74	0.65	1.08	1.88	1.68	2.65	1.33	1.25	1.94
	3D025	1.02	0.82	1.09	2.01	2.01	2.61	1.43	1.25	1.76

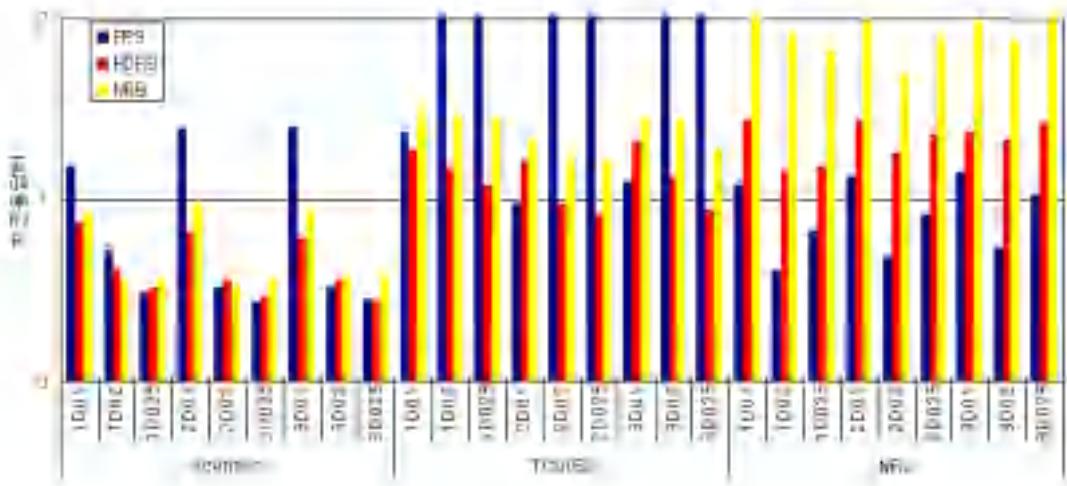


그림 4.3 4층 구조물 기기 지진응답비율 (1층기기)

표 4.8에서는 1층 기기의 지진응답비를 비교하였다. 지진응답비를 진동 대 운동에 대하여 면진기기의 응답의 비를 나타내므로써 면진장치의 효율성을 알 수 있게 한다. 지진응답비가 1이라는 것은 면진효과가 없다는 것이고, 1보다 작을 경우 면진효과가 있다는 것을 의미한다. 지진응답비는 표로 정리하였을 경우 전체적인 경향을 파악하는 것이 쉽지 않으므로 그래프로 각각 도시하였다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 Scenario지진의 경우를 제외하면 대부분의 경우에 지진응답비가 1을 상회하는 것으로 나타나고 있다. 이것은 면진장치의 사용으로 오히려 지진응답의 증폭이 발생하고 있다는 것을 나타낸다. 설계된 면진장치의 목표진동수가 적용한 지진파와 비교하여 충분한 면진력을 발휘하지 못한 것으로 판단된다. Scenario의 경우는 탁월주파수 범위가 20Hz 이상의 고주파수 부근이므로 면진효과를 발휘할 수 있었을 것으로 판단된다. TCU지진의 경우 거의 모든 경우에 면진효과를 발휘하지 못하는 것으로 나타나는 것은 탁월주파수 영역이 1Hz 부근이므로 FPS의 경우는 자체의 고유진동수와 공진을 일으켜서 지진력이 증폭되는 것을 알 수 있다. 일부 경우는 지진력이 7배 이상 증폭이 되는 경우도 있으나 이러한 경우는 FPS의 변위한계에 도달하여 slider가 FPS의 벽면에 충돌을 일으키므로 커다란 가속도 응답이 관측된 것으로 판단된다. Scenario의 경우와 NRC의 경우는 면진장치별 지진응답이 확연하게 차이

가 나는 것을 알 수 있는데 Scenario의 경우는 FPS는 지진력 저감효과가 가장 작고 NRB와 HDRB는 비슷한 값의 분포를 가지고 있는 것으로 나타난 반면 NRC의 경우는 지진응답비율이 NRB>HDRB>FPS의 순서로 나타나는 것을 알 수 있다. Scenario는 20Hz 이상에서 탁월주파수대가 형성이 되어 있고 저주파로 갈수록 일정하게 스펙트럼 응답이 감소하므로 면진장치의 고유진동수가 큰 순서로 지진응답이 나타나고 있다. 따라서 HDRB의 응답이 가장 크고 그 다음 NRB와 FPS의 순서를 갖는 것을 알 수 있다. 다만 NRB와 HDRB의 고유진동수의 차이가 그리 크지 않고 해당 주파수에서의 응답이 명확하게 차이가 발생하고 있지 않기 때문에 그 차이가 크지 않을 것을 알 수 있다.

NRC의 경우 입력지진의 응답스펙트럼에서 보면 탁월주파수 영역이 2~7Hz 부근에서 형성되는 것을 알 수 있는데 특별히 NRB의 설계진동수에 해당하는 2.3Hz 부근에서 가장 큰 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 NRB의 경우는 지진력이 증폭되고 있고 NRB보다 좀 고진동수의 고유진동수를 가지는 HDRB는 그 다음의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 다음으로 FPS는 가장 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다. NRC의 경우는 각 면진장치의 주파수 대역에서의 지진입력의 응답스펙트럼값의 차이가 명확하게 나타나고 있기 때문에 이러한 차이가 지진응답비에도 그대로 반영이 되고 있음을 알 수 있다.

다음으로 4층 구조물 4층 바닥면에 설치되어 있는 기기의 지진응답을 살펴보았다. 4층 바닥면에 설치되어 있는 기기는 지진응답비를 두가지로 구분하여 표현하였다. 즉 4층 바닥면에서 계측된 지진가속도를 기준으로 기기에서 계측된 지진가속도를 비교한 경우와 진동대에서 입력된 지진력을 기준으로 비교한 경우이다. 기기가 설치되어 있는 바닥면의 지진가속도와 비교한 것이 면진장치 고유의 면진성능을 판단할 수 있는 반면 진동대 입력지진과 비교한 것은 구조물의 고유진동수를 통해서 변화된 입력지진의 효과를 반영하여 비교할 수 있다. 4층에서의 응답을 기준으로 한 비교는 표 4.9와 그림 4.4에 제시하였다.

표 4.9 4층 구조물 기기 지진응답비 (4층 기기, 4층 기준)

지진파	차원	4층 FPS			4층 NRB			4층 HDRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	1.36	-	-	1.29	-	-	1.42	-	-
	1D02	0.47	-	-	0.72	-	-	0.78	-	-
	1D025	0.72	-	-	0.77	-	-	0.81	-	-
	2D01	1.38	0.81	-	1.09	0.88	-	1.35	0.61	-
	2D02	0.49	0.45	-	0.71	0.90	-	0.67	0.72	-
	2D025	0.67	0.61	-	0.67	0.75	-	0.69	0.58	-
	3D01	1.05	0.59	2.62	0.98	0.85	1.26	1.28	0.59	1.46
	3D02	0.70	0.50	2.72	0.61	0.63	1.04	0.60	0.49	1.21
	3D025	0.92	0.57	2.68	0.61	0.62	0.93	0.64	0.44	1.04
TCU052	1D01	0.93	-	-	1.23	-	-	1.54	-	-
	1D02	1.05	-	-	1.71	-	-	1.47	-	-
	1D025	1.06	-	-	1.04	-	-	1.37	-	-
	2D01	1.08	0.79	-	1.30	1.59	-	1.69	1.13	-
	2D02	1.58	0.99	-	0.42	0.57	-	0.53	0.46	-
	2D025	1.62	1.13	-	0.83	1.40	-	1.23	1.14	-
	3D01	0.75	0.87	1.29	1.10	1.55	3.14	1.52	1.20	1.92
	3D02	1.30	1.01	4.16	0.33	0.62	1.90	0.44	0.51	1.66
	3D025	1.23	1.02	1.87	0.73	1.46	1.76	1.02	1.24	1.45
NRC	1D01	0.66	-	-	1.52	-	-	1.62	-	-
	1D02	0.51	-	-	1.05	-	-	1.21	-	-
	1D025	0.60	-	-	0.86	-	-	1.08	-	-
	2D01	0.71	0.46	-	1.29	1.33	-	2.71	0.91	-
	2D02	0.50	0.43	-	0.76	1.21	-	1.09	0.88	-
	2D025	0.62	0.50	-	0.82	0.96	-	1.10	0.80	-
	3D01	0.78	0.46	1.31	1.29	1.37	2.66	1.37	0.94	2.11
	3D02	0.54	0.50	1.52	0.62	1.13	3.50	0.92	0.84	2.06
	3D025	0.56	0.55	1.59	0.82	1.01	3.23	1.02	0.84	2.31

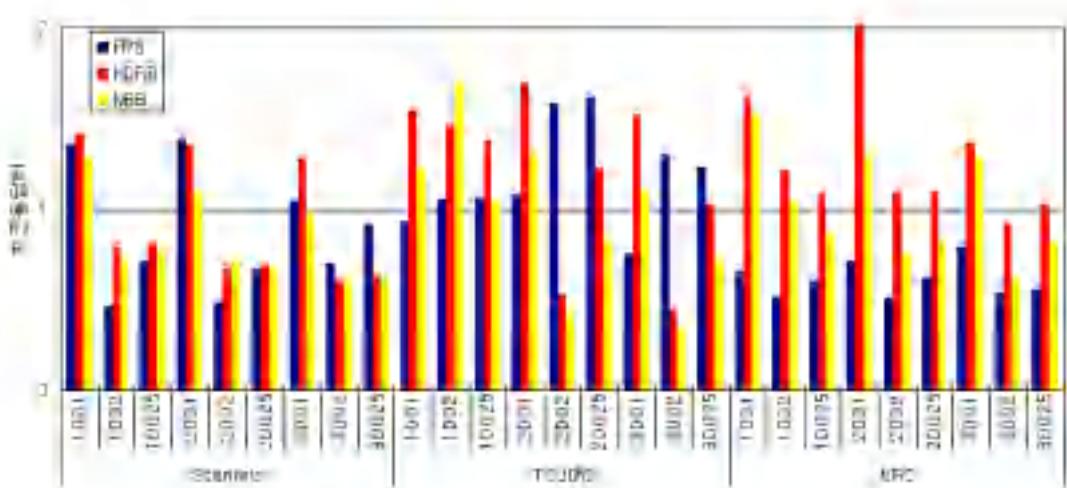


그림 4.4 4층 구조물 기기 지진응답비율 (4층 기기, 4층 기준)

표 4.9와 그림 4.4에서 보는 바와 같이 4층에 설치되어 있는 기기의 경우는 1층에 설치되어 있는 기기에 비하여 지진력이 크게 감소된 것을 알 수 있다. 그러나 많은 경우 오히려 면진장치의 설치로 인해서 지진력이 증폭된 경우도 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 랜덤진동에 의한 실험결과를 통해서 그 이유를 분석해 볼 수 있다. 그림 4.1(b)에서 제시하고 있는 4층 구조물의 기기가 설치되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 랜덤진동 실험결과를 보면, 기기가 설치되어 있지 않은 경우는 애초에 목표로 했던 구조물의 고유진동수인 4Hz 부근의 진동수가 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 기기가 설치 된 후에는 전체 시스템의 고유진동수가 2.9Hz로 감소된 것을 알 수 있다. 전체 구조물의 중량에 비하여 설치되어 있는 기기의 중량이 상대적으로 큰 비중을 차지하기 때문에 구조물의 동특성을 크게 변화시킨 것을 알 수 있다. 따라서 2.3Hz로 설계한 NRB의 경우는 구조물의 공진에 의한 영향을 받게되는 것이다. 또한 HDRB의 경우는 NRB보다 강성이 더 크기 때문에 고유진동수도 3-4Hz 부근으로 나타나는데 이러한 경우는 NRB에 비하여 더 큰 영향을 받게 되는 것이다. 따라서 지진응답비를 살펴보면 HDRB의 경우 가장 큰 응답을 보이고 NRB는 그 응답의 증가가 HDRB에 비하여 적게 나타나는 것을 알 수 있다. FPS의 경우는 상대적으로 가장 좋은 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 다만 TCU052의 경우는 일부 경우에 지진파 자체의 저진동수 특성이 반영이 되므로서 지진력이 증폭되고 있는 것을 알 수 있다.

또한 지진응답비 그림을 보면 각 지진파의 PGA에 따라서 지진응답비가 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 Scenario의 경우 1차원 가진의 경우의 응답이 가장 큰 값을 보이고 있으며, NRC의 경우도 PGA의 증가에 따라서 면진효과가 증가하는 것 같은 현상을 보이고 있다. TCU052의 경우는 PGA의 증가에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 좀 더 자세히 비교해 보기 위하여 각 경우별 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼에서 각 면진장치의 고유진동수에서의 응답값을 비교해 보았다. FPS의 1Hz, NRB의 2.3Hz 그리고 HDRB의 3Hz에서의 스펙트럴 응답값을 각 지진파별로 그림 4.5에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 정규화된 응답스펙트럼의 응답값이 각 지진파별로 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. Scenario의

경우 목표 PGA가 가장 작은 0.1g인 경우의 응답값이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 지진응답비에서 나타난 결과는 PGA의 증가에 따라서 면진효과가 증가하는 것은 아니고 입력지진이 균일하게 입력되지 못함으로 인해서 발생하는 결과인 것으로 판단된다. NRC의 경우도 Scenario 만큼 명확하게 나타나지는 않지만 전체적으로 0.1g를 목표 PGA로 한 경우의 응답이 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. TCU052는 PGA에 따른 지진응답비의 경향이 나타나지 않는 것과 같이 입력지진의 응답스펙트럼 값도 PGA에 따라 변화되는 모습을 보여주지 않고 있다.

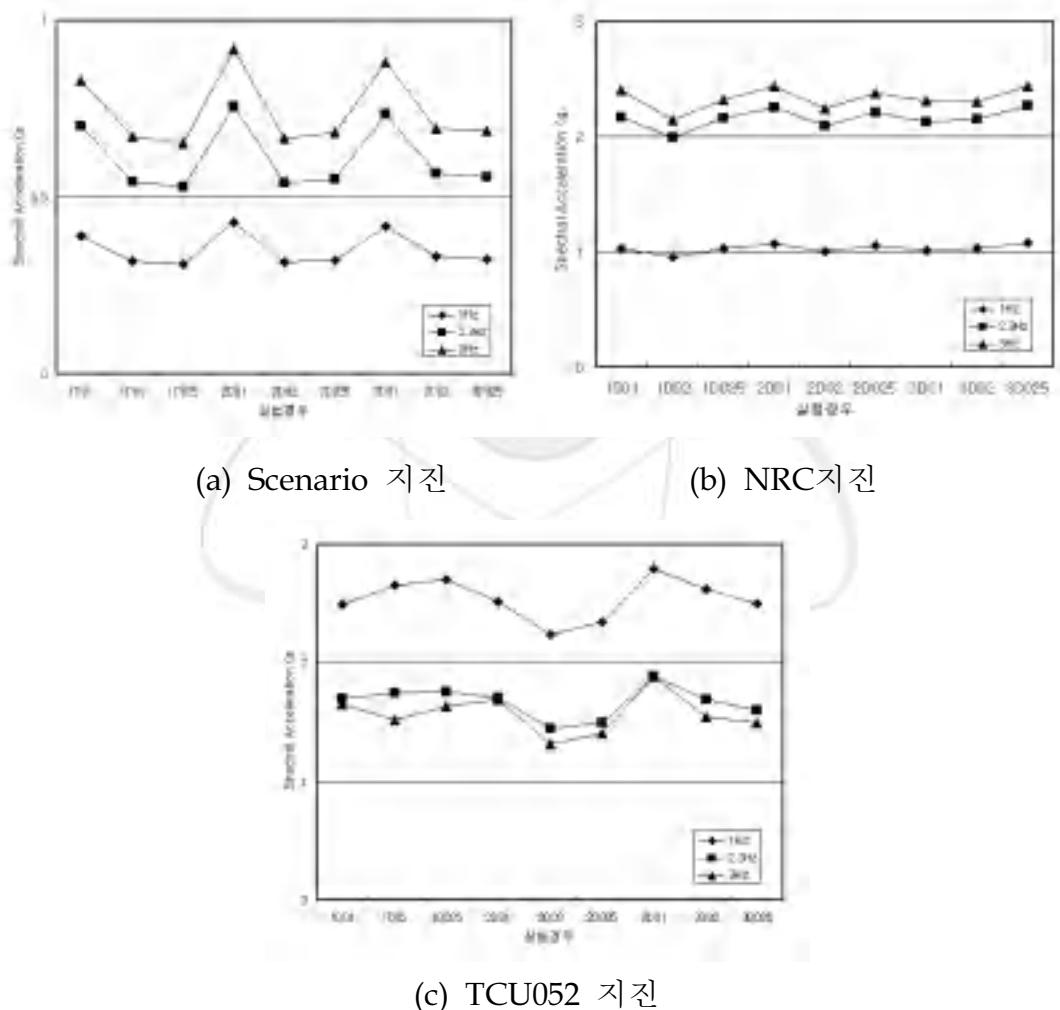


그림 4.5 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼에서 주파수별 응답

다음으로 4층 기기의 1층에서의 입력지진기준으로 지진응답비를 산출하여 표 4.10과 그림 4.6에 정리하였다. 구조물에서의 응답을 비교한 표 4.6에서 보는 바와 같이 NRC와 TCU052는 입력지진에 비하여 4층 응답이 증폭되었으며, Scenario는 오히려 구조물에서의 응답이 오히려 감소된 것이 결과에 반영된 결과라고 할 수 있다. 그래프에서는 지진응답비를 2까지만 표시하도록 하였다.

표 4.10 4층 구조물 기기 지진응답비율 (4층 기기, 1층 기준)

지진파	차원	4층 FPS			4층 NRB			4층 HDRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	1.33	-	-	1.26	-	-	1.39	-	-
	1D02	0.51	-	-	0.78	-	-	0.85	-	-
	1D025	0.67	-	-	0.73	-	-	0.76	-	-
	2D01	1.53	1.39	-	1.21	1.52	-	1.49	1.05	-
	2D02	0.56	0.55	-	0.81	1.11	-	0.77	0.88	-
	2D025	0.81	0.93	-	0.81	1.14	-	0.85	0.88	-
	3D01	1.18	1.13	4.23	1.10	1.62	2.03	1.44	1.12	2.35
	3D02	0.93	0.88	4.28	0.80	1.12	1.63	0.80	0.87	1.90
	3D025	1.19	1.04	4.12	0.79	1.13	1.43	0.82	0.81	1.60
TCU052	1D01	1.49	-	-	1.97	-	-	2.47	-	-
	1D02	1.35	-	-	2.20	-	-	1.89	-	-
	1D025	1.58	-	-	1.53	-	-	2.04	-	-
	2D01	1.49	1.21	-	1.79	2.45	-	2.34	1.74	-
	2D02	5.29	5.80	-	1.42	3.33	-	1.78	2.69	-
	2D025	2.27	2.52	-	1.16	3.14	-	1.73	2.55	-
	3D01	1.46	1.46	1.76	2.14	2.61	4.28	2.94	2.02	2.61
	3D02	5.69	5.08	5.35	1.46	3.13	2.44	1.92	2.54	2.14
	3D025	2.05	2.26	2.24	1.21	3.25	2.10	1.70	2.75	1.73
NRC	1D01	1.05	-	-	2.42	-	-	2.58	-	-
	1D02	0.82	-	-	1.68	-	-	1.94	-	-
	1D025	1.20	-	-	1.72	-	-	2.16	-	-
	2D01	1.28	0.89	-	2.31	2.55	-	4.86	1.74	-
	2D02	1.00	0.97	-	1.49	2.77	-	2.16	2.00	-
	2D025	1.25	1.14	-	1.65	2.19	-	2.23	1.83	-
	3D01	1.34	0.94	1.51	2.20	2.78	3.08	2.34	1.91	2.45
	3D02	1.28	1.16	1.66	1.48	2.58	3.83	2.19	1.93	2.25
	3D025	1.21	1.16	1.64	1.78	2.13	3.33	2.22	1.77	2.39

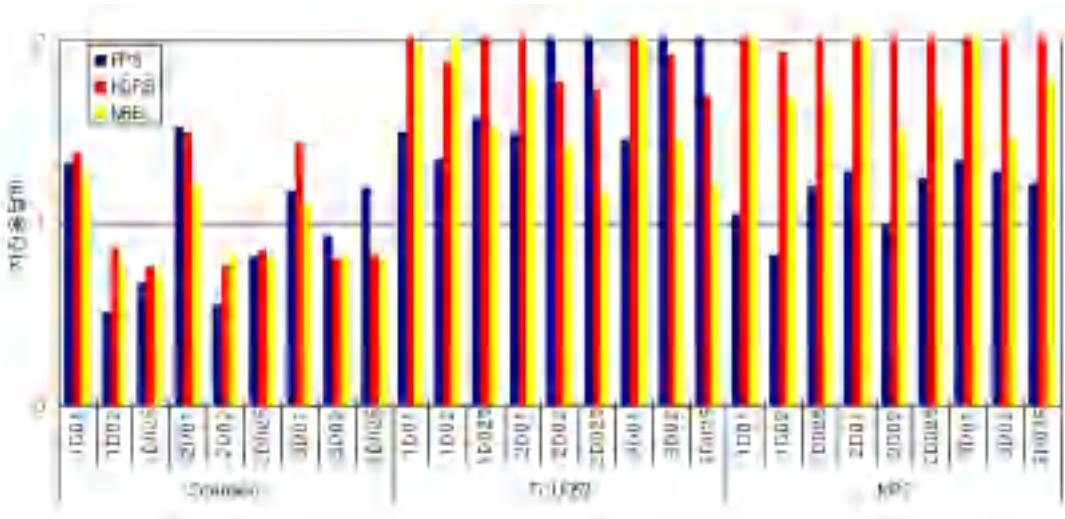


그림 4.6 4층 구조물 기기 지진응답비 (4층기기, 1층 기준)

그림과 표에서 보는 바와 같이 4층 기기의 지진응답비를 1층응답을 기준으로 표현하였을 경우에는 4층의 응답을 기준으로 비교하였을 경우와 비교하여 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림 4.5와 표 4.9에서 제시한 4층 응답기준의 지진응답비의 경우에 비하여 지진응답비율이 높게 나타난 것을 알 수 있다. NRC와 TCU052의 경우 구조물에서 지진력의 증폭이 상당하게 발생했기 때문에 1층의 입력지진을 기준으로 비교한 경우에는 지진응답비가 큰 값을 나타낸 것이다. 그러나 Scenario의 경우는 4층의 응답이 오히려 구조물에서 지진력이 감소되었기 때문에 지진응답비가 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 기기면진시는 구조물의 동특성을 고려한다면 진장치의 선택이 중요한 요소임을 알 수 있다.

### 3. 시간이력 분석

다음으로 목표 PGA 0.2g인 경우 1층과 4층에서 각 기기의 응답가속도 시간이력을 그림 4.7과 4.8에 비교하였다. 앞에서 정량화하여 비교한 것과 동일하게 구조물 내부의 기기는 NRB와 HDRB로 면진한 경우 면진효과가 큰 것으로 나타났다. FPS의 경우 면진효과가 크게 나타나지 않은 것은 목표주기를 1초로 설정하여 설계한 것이 구조물 자체의 고유진동수와 비교하여 큰 면진효과를 발휘하지 못하는 것으로 판단된다. 그림에서 보는 바와 같이 FPS의 경우는 초기강성이 상대적으로 크게 나타나므로 입력지진과 비교하여 약 4-5초 정도까지는 동일한 거동을 보이다가 그 이후에 면진거동을 하는 것을 알 수 있다. 반면 초기강성이 작은 NRB와 HDRB는 진동초기부터 움직임이 관찰되는 것을 알 수 있다. 결국 고무베어링의 경우는 공진주파수대의 위치에 따라 면진효과가 크게 변화하는 반면 FPS의 경우는 입력지진의 공진주파수영역에 비교적 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 따라서 입력지진의 공진영역과, 기기면진인 경우 기기가 설치되어 있는 구조물의 진동특성을 정확하게 예측할 수 있다면 NRB와 HDRB와 같은 고무계 베어링을 사용하는 것이 면진효과를 높이는데 효과적일 것으로 판단되며, 면진효과의 목표치를 작게 선정하여 광범위한 영역에서의 면진효과를 높이고자 한다면 FPS를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

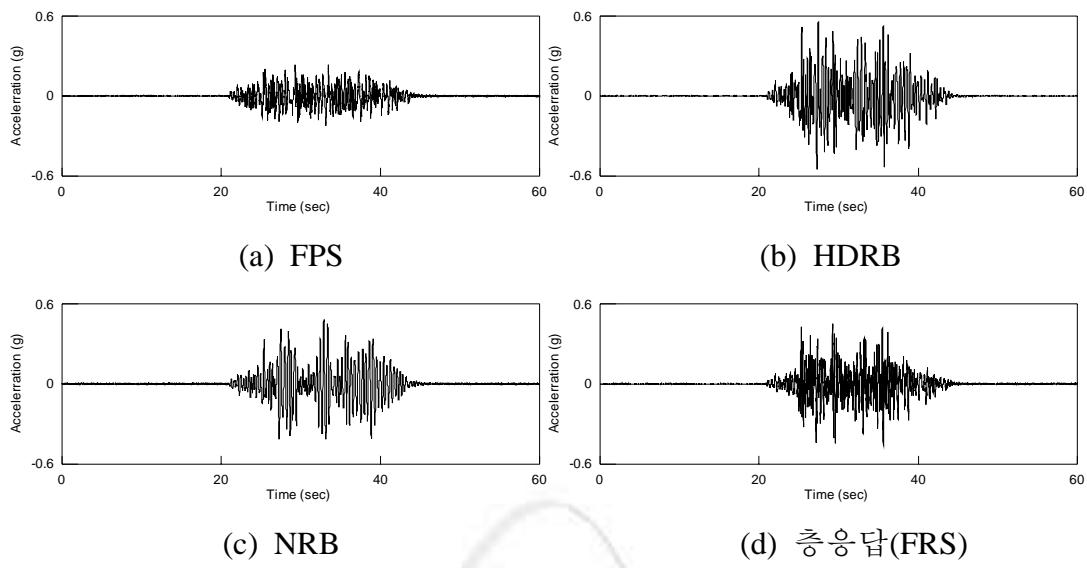
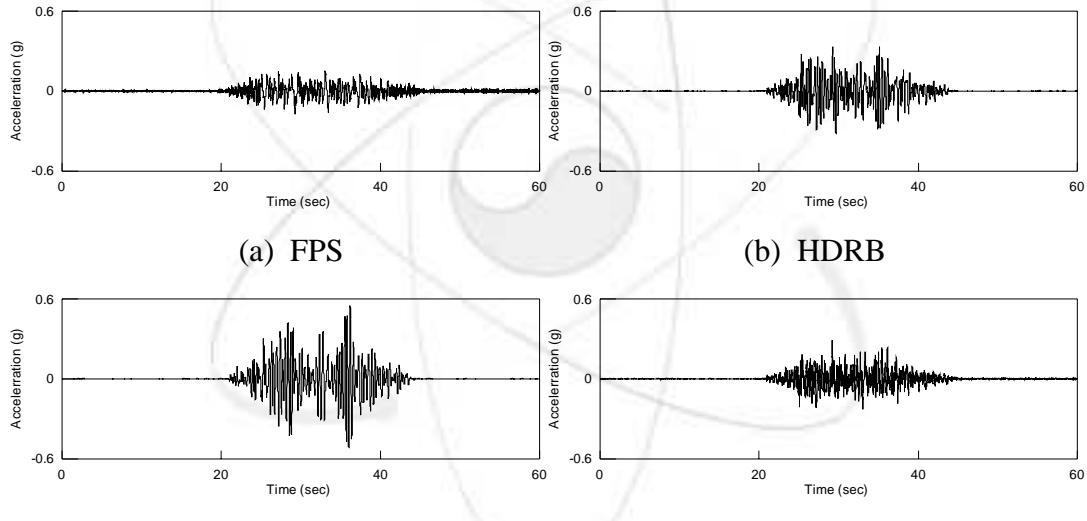


그림 4.7 NRC 지진시 응답(1D, 0.2g, 4층 구조물 4층 기기)



(c) NRD (d) Table Motion

#### 4. 응답스펙트럼 분석

각 지진파에 따른 면진기기에서의 응답을 응답스펙트럼으로 표시하여 그림 4.9~4.11에 도시하였다. 응답스펙트럼을 비교하여 보면 결과의 차이를 좀 더 분명하게 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 1층기기의 경우는 입력지진의 고유진동수 범위가 2-10Hz 부근에서 광범위하게 발생하고 있으므로 고무베어링의 경우는 면진장치의 공진영역인 2-3Hz 부근에서 증폭이 발생하는 반면, FPS의 경우는 공진영역이 1Hz 부근이므로 상대적으로 증폭이 적게 발생하여 면진효과가 발휘되는 것을 알 수 있다. 4층에 위치한 기기의 경우에는 구조물의 고유진동수에 해당되는 4Hz 부근에서 층응답스펙트럼이 크게 증폭되는 것을 알 수 있다. 2Hz에서 발생한 Peak는 4층에 설치된 기기의 질량에 의하여 발생한 것이고 11Hz에서 발생한 Peak는 구조물의 2차 모드에 해당된다. 따라서 고무베어링의 경우는 공진영역을 벗어나 있으므로 상당히 큰 면진효과가 있는 것으로 나타났으나 FPS의 경우는 면진효과가 그리 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한 FPS의 경우 2Hz 부근에서 발생한 Peak는 증폭된 FRS에 의해서 기기에서의 증폭이 발생한 것으로 판단된다.

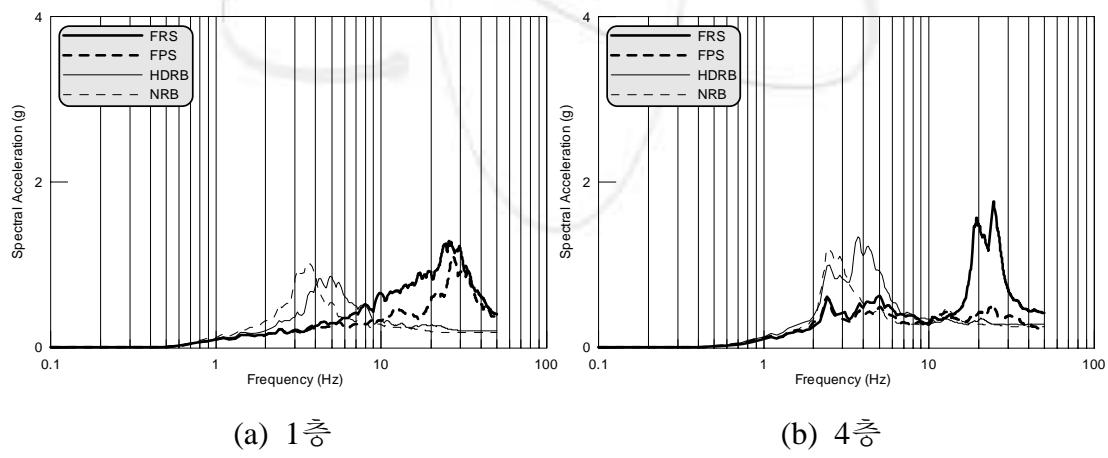


그림 4.9 Scenario 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)

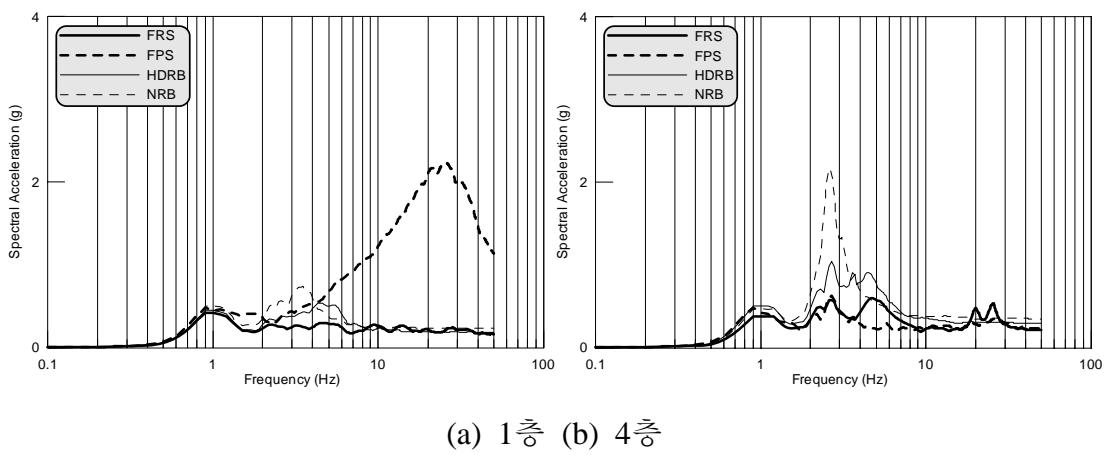


그림 4.10 TCU052 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)

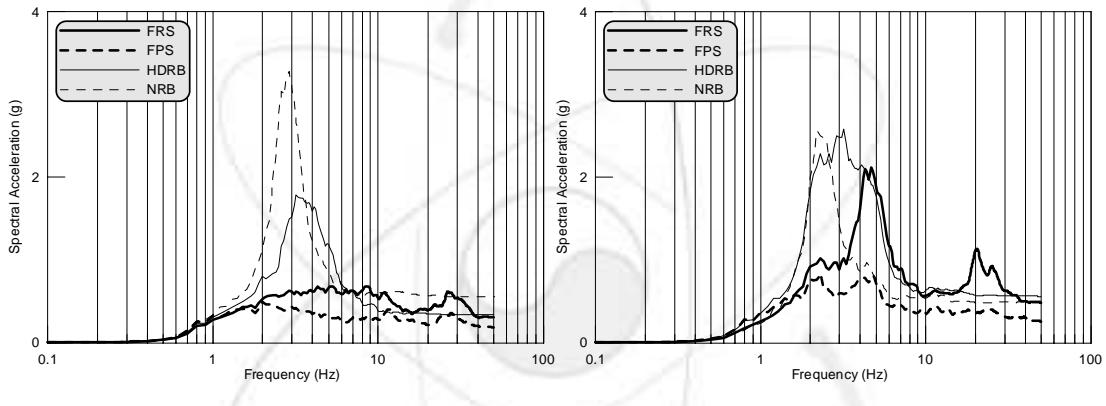


그림 4.11 NRC 지진시 응답스펙트럼 (4층 구조물)

## 제 4 절 원전 구조물 모형 (2층)

본 절에서는 4층 구조물에 면진기기를 설치하였을 때와 동일한 방법으로 2층 구조물에 설치되어 있는 면진기기의 응답을 분석하여 그 특성을 살펴보았다.

### 1. PGA분석

먼저 목표로 설정한 PGA에 따라 실제로 진동대에 입력된 지진파의 PGA와 그에 따른 각 기기에서의 응답을 PGA만을 중심으로 정리하여 1층의 기기와 2층의 기기에 대하여 각각 표 4.11과 표 4.12에 정리하였다.

표 4.11 2층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g)

지진파	차원	Table Target			Table max			FPS 1F			1F HDRB			1F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	0.1	-	-	0.124	0.013	0.002	0.551	0.081	0.021	0.123	0.010	0.011	0.114	0.004	0.007
	1D02	0.2	-	-	0.271	0.017	0.004	0.274	0.125	0.035	0.213	0.010	0.020	0.180	0.016	0.022
	2D01	0.1	-	0.067	0.113	0.015	0.070	0.601	0.094	0.079	0.123	0.011	0.100	0.111	0.010	0.117
	2D02	0.2	-	0.134	0.267	0.029	0.180	0.274	0.108	0.209	0.206	0.052	0.237	0.176	0.040	0.234
	3D01	0.1	0.1	0.067	0.109	0.108	0.068	0.560	0.184	0.083	0.115	0.098	0.102	0.109	0.115	0.096
	3D02	0.2	0.2	0.134	0.263	0.270	0.179	0.299	0.205	0.211	0.196	0.140	0.217	0.183	0.172	0.244
TCU052	1D01	0.1	-	-	0.078	0.032	0.010	0.197	0.037	0.018	0.118	0.052	0.018	0.130	0.037	0.010
	1D02	0.2	-	-	0.146	0.049	0.030	0.133	0.052	0.037	0.179	0.070	0.034	0.237	0.037	0.041
	2D01	0.1	-	0.044	0.079	0.045	0.040	0.068	0.050	0.043	0.133	0.056	0.072	0.134	0.022	0.097
	2D02	0.2	-	0.088	0.143	0.054	0.102	0.121	0.059	0.114	0.174	0.060	0.129	0.238	0.039	0.159
	3D01	0.1	0.08	0.044	0.076	0.069	0.040	0.222	0.073	0.041	0.125	0.089	0.055	0.121	0.108	0.111
	3D02	0.2	0.196	0.088	0.135	0.116	0.095	0.128	0.144	0.093	0.177	0.151	0.110	0.244	0.168	0.159
NRC	1D01	0.1	-	-	0.127	0.015	0.013	0.527	0.054	0.027	0.252	0.023	0.017	0.268	0.024	0.038
	1D02	0.2	-	-	0.241	0.017	0.008	0.291	0.101	0.031	0.468	0.033	0.030	0.515	0.035	0.133
	2D01	0.1	-	0.1	0.128	0.016	0.104	0.158	0.066	0.107	0.253	0.015	0.183	0.270	0.022	0.263
	2D02	0.2	-	0.2	0.243	0.054	0.218	0.282	0.086	0.231	0.469	0.048	0.357	0.483	0.037	0.524
	3D01	0.1	0.1	0.1	0.139	0.138	0.105	0.520	0.162	0.108	0.250	0.185	0.184	0.263	0.256	0.273
	3D02	0.2	0.2	0.2	0.235	0.276	0.212	-	-	-	-	0.368	0.340	0.459	0.484	0.524

표 4.12 2층 구조물 지진응답 (2층 기기, PGA:g)

지진파	차원	Table max			2F response			2F FPS			2F HDRB			2F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	0.124	0.013	0.002	0.157	0.062	0.006	0.164	0.058	0.022	0.146	0.020	0.019	0.160	0.012	0.028
	1D02	0.271	0.017	0.004	0.370	0.095	0.016	0.261	0.116	0.052	0.232	0.021	0.041	0.234	0.023	0.070
	2D01	0.113	0.015	0.070	0.158	0.128	0.115	0.199	0.087	0.172	0.156	0.032	0.178	0.176	0.024	0.142
	2D02	0.267	0.029	0.180	0.368	0.296	0.314	0.298	0.199	0.490	0.234	0.061	0.349	0.230	0.043	0.278
	3D01	0.109	0.108	0.068	0.171	0.303	0.114	0.192	0.198	0.188	0.156	0.142	0.166	0.159	0.141	0.103
	3D02	0.263	0.270	0.179	0.414	0.623	0.313	0.329	0.364	0.470	0.208	0.229	0.301	0.228	0.219	0.273
TCU052	1D01	0.078	0.032	0.010	0.084	0.045	0.007	0.090	0.055	0.025	0.163	0.067	0.030	0.144	0.050	0.014
	1D02	0.146	0.049	0.030	0.164	0.127	0.046	0.154	0.175	0.052	0.228	0.098	0.053	0.259	0.040	0.058
	2D01	0.079	0.045	0.040	0.094	0.095	0.051	0.099	0.110	0.050	0.165	0.059	0.080	0.151	0.034	0.121
	2D02	0.143	0.054	0.102	0.149	0.157	0.087	0.165	0.164	0.142	0.227	0.088	0.133	0.259	0.046	0.201
	3D01	0.076	0.069	0.040	0.079	0.107	0.046	0.080	0.197	0.057	0.148	0.176	0.076	0.144	0.141	0.105
	3D02	0.135	0.116	0.095	0.151	0.207	0.098	0.152	0.206	0.163	0.225	0.220	0.141	0.253	0.251	0.175
NRC	1D01	0.127	0.015	0.013	0.293	0.047	0.027	0.232	0.038	0.049	0.246	0.027	0.037	0.391	0.037	0.084
	1D02	0.241	0.017	0.008	0.471	0.060	0.023	0.305	0.054	0.047	0.436	0.041	0.109	0.546	0.037	0.301
	2D01	0.128	0.016	0.104	0.266	0.062	0.115	0.263	0.049	0.152	0.247	0.029	0.225	0.367	0.032	0.327
	2D02	0.243	0.054	0.218	0.456	0.170	0.216	0.322	0.099	0.298	0.429	0.050	0.412	0.566	0.049	0.656
	3D01	0.139	0.138	0.105	0.417	0.305	0.116	0.277	0.264	0.143	0.246	0.293	0.204	0.294	0.346	0.321
	3D02	0.235	0.276	0.212	0.484	0.737	0.223	0.308	0.341	0.281	0.415	0.476	0.415	0.527	0.640	0.594

표에서 보는 바와 같이 4층 구조물의 경우와 유사하게 실제로 목표로 한 지진의 PGA를 진동대에서 구현하는 일을 쉽지 않은 일이다. 따라서 이러한 영향을 고려한 분석을 수행하는 것이 타당하다. PGA뿐만 아니라 실제 목표로 했던 지진파형을 그대로 구현하는 것 또한 용이한 일은 아니다. 따라서 실험의 매 경우 각 지진파의 주파수 특성을 분석하여 기기응답을 분석하는 것이 타당성 있는 분석이 될 것이다. 2층 구조물에 대하여 목표로 했던 PGA와 실제 진동대에서 계측된 PGA를 비교하여 표 4.13에 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. 이러한 현상은 4층 구조물의 경우와 동일한 현상으로 역시 저진동수 부근이 탁월한 지진파를 진동대가 모사하기에 어려움이 있었을 것으로 판단된다.

표 4.13 4층 구조물에서 목표지진과 실제 입력된 지진의 PGA 비교 (단위:g)

	Target	Scenario	TCU052	NRC
1D	0.1	0.124	0.078	0.127
	0.2	0.271	0.146	0.241
2D	0.1	0.113	0.079	0.128
	0.2	0.267	0.143	0.243
3D	0.1	0.109	0.076	0.139
	0.2	0.263	0.135	0.235

표 4.12에서 구조물에서의 응답을 살펴보면 입력지진의 탁월주파수대와 구조물의 공진주파수 영역이 일치하는 NRC의 경우 증폭이 가장 크게 발생하고 있는 반면 Scenario와 TCU052의 경우는 증폭이 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이 경우는 입력지진보다 지진력이 감소된 경우는 나타나고 있지 않다.

입력된 지진파의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 각 입력지진파의 PGA를 1g로 정규화 하여 그림 4.12에서 그 응답스펙트럼을 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진의 경우는 목표로 한 지진과 실제 진동대에서 모사한 지진파의 응답스펙트럼이 상당히 잘 맞는 것을 알 수 있다. TCU052의 경우도 1-10Hz 부분의 영역은 4층 구조물의 경우에 비하여 상당히 잘 맞는 결과를 보여주고 있다. 반면 NRC의 경우는 다소의 차이가 발생하는 것을 알 수 있고 특히 몇 가지 경우는 목표지진과 전혀 다른 지진파가 실험에 사용되었음을 알 수 있다. 전체적으로 2층 구조물의 경우 목표지진을 비교적 잘 모사할 수 있었던 것은 구조물의 고유진동수가 7.42Hz 이므로 진동대가 모사하기에 용이한 주파수 영역이었던 것으로 판단된다. 그러나 이 응답스펙트럼은 PGA를 1g로 정규화 한 것으로 실제 PGA가 다르므로 지진파가 잘 구현됐다고 할 수는 없지만 주파수대는 비교적 잘 구현했다고 할 수 있다.

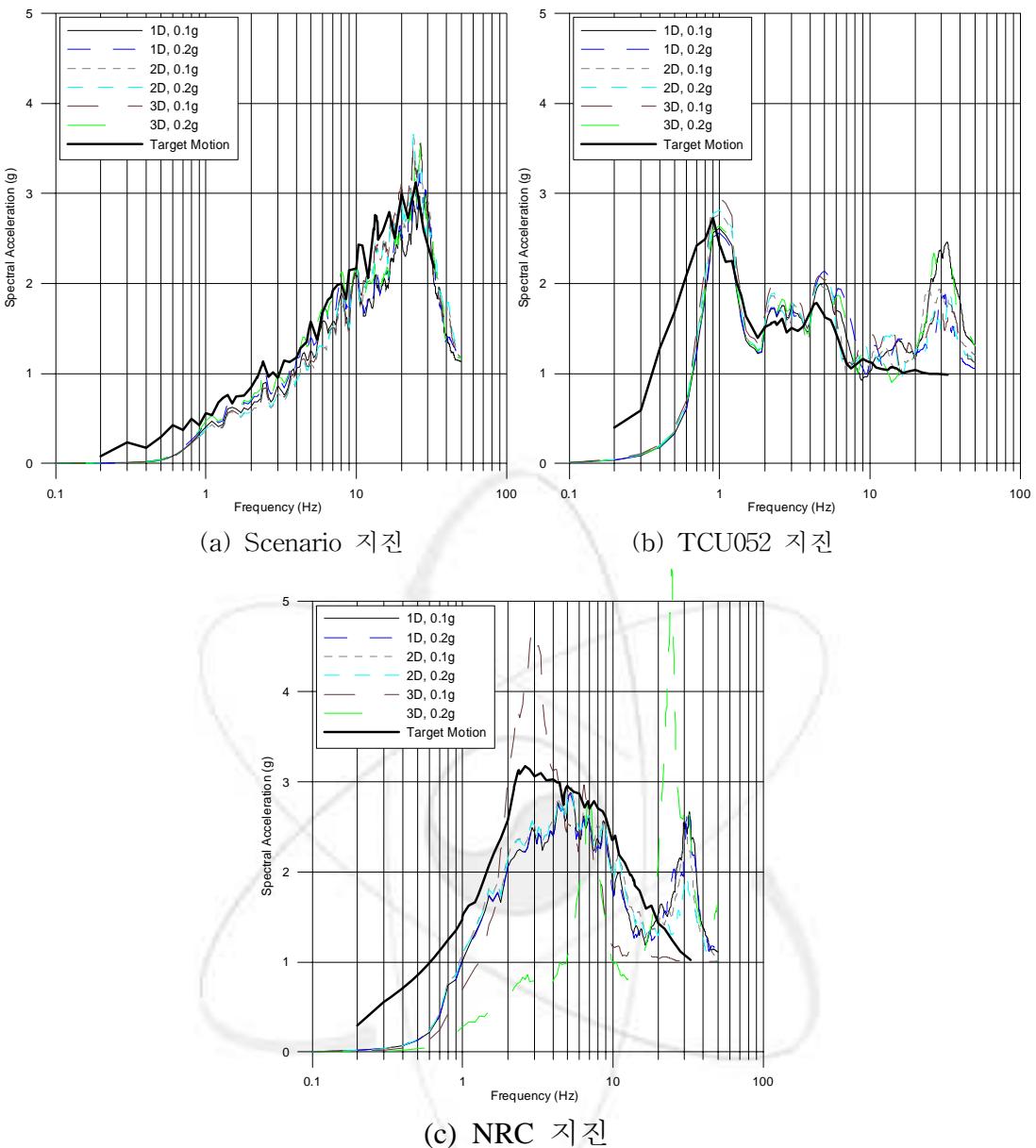


그림 4.12 입력지진의 정규화된 응답스펙트럼 (2층 구조)

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. Scenario지진과 NRC지진의 경우는 비교적 지진파간의 편차가 적은 것으로 보이나 TCU052지진의 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

하더라고 매 실험에 따라 같은 지진파라고 볼 수는 없으며 모든 경우 다른 지진을 사용한 것으로 가정하고 면진기기의 응답을 분석하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 다만 이 경우는 진동대가 4층 구조물에 비하여 균일하게 지진파를 모사했음을 알 수 있다.

## 2. 지진응답비 분석

4층 구조물의 경우와 동일한 방법을 이용하여 2층 구조물에 대하여 지진응답비를 산출하여 다음의 표4.14~4.16과 그림 4.13~4.15에 제시하였다.

표 4.14 2층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)

지진파	차원	FPS 1F			1F HDRB			1F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	4.44	6.16	12.24	0.99	0.73	6.41	0.92	0.31	4.35
	1D02	1.01	7.56	7.91	0.79	0.58	4.57	0.66	0.99	4.91
	2D01	5.32	6.39	1.12	1.09	0.74	1.42	0.98	0.68	1.66
	2D02	1.03	3.74	1.16	0.77	1.80	1.31	0.66	1.38	1.30
	3D01	5.13	1.70	1.21	1.05	0.91	1.51	1.00	1.07	1.41
	3D02	1.13	0.76	1.18	0.74	0.52	1.21	0.69	0.64	1.36
TCU052	1D01	2.54	1.17	1.75	1.52	1.66	1.81	1.67	1.18	0.95
	1D02	0.91	1.07	1.23	1.22	1.45	1.15	1.63	0.77	1.36
	2D01	0.86	1.11	1.07	1.69	1.25	1.83	1.69	0.48	2.46
	2D02	0.85	1.09	1.12	1.22	1.10	1.27	1.66	0.71	1.57
	3D01	2.90	1.06	1.02	1.64	1.29	1.38	1.59	1.58	2.78
	3D02	0.95	1.24	0.97	1.32	1.30	1.15	1.81	1.45	1.67
NRC	1D01	4.15	3.69	2.05	1.99	1.54	1.35	2.11	1.64	2.97
	1D02	1.21	6.07	3.83	1.94	1.95	3.79	2.14	2.07	16.64
	2D01	1.23	4.21	1.04	1.97	0.92	1.77	2.11	1.42	2.54
	2D02	1.16	1.58	1.06	1.93	0.89	1.64	1.99	0.69	2.40
	3D01	3.74	1.17	1.03	1.80	1.33	1.75	1.89	1.85	2.60
	3D02	-	-	-	-	1.34	1.60	1.95	1.76	2.48

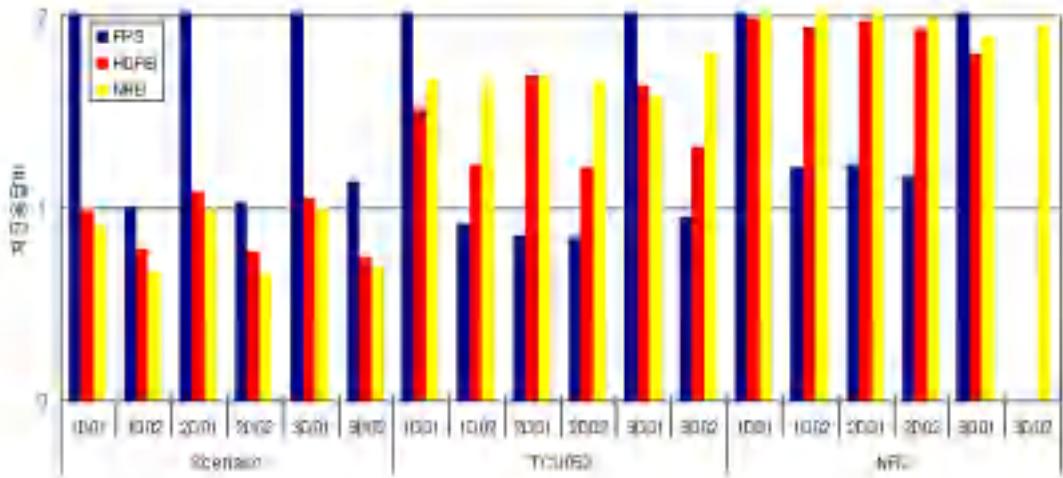


그림 4.13 2층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)

표 4.14에서는 1층 기기의 지진응답비를 비교하였다. 1층 기기의 지진응답비는 구조물의 영향을 받지 않으므로 4층 구조물 1층의 경우와 동일한 응답이 발생하는 것이 정상적인 결과이지만 전술한 바와 같이 진동대가 지진파를 표현하는 것이 때 경우 일정하지 않으므로 지진응답비도 다소 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 3차원 0.2g를 목표로 한 경우에는 계측에 실패한 경우가 있으므로 분석에서 제외되었다. 전반적으로는 목표 지진파의 탁월주파수 대역에 따라 4층 구조물에서의 경우와 유사한 형태의 결과를 보이고 있다. 즉 Scenario의 경우는 면진효과를 일부분 발휘하고 있는 반면 NRC와 TCU052의 경우는 그렇지 못한 것을 알 수 있다. 특히 TCU052에서는 4층 구조물의 경우와 동일하게 일부 실험에서 지진응답비가 4 이상의 큰 값을 관측할 수 있는 것을 알 수 있다. 이것은 역시 FPS의 slider가 벽면에 충돌을 일으킨 것으로 판단되며 FPS의 변위를 추적해봄으로서 더욱 정확하게 알 수 있을 것으로 판단된다. 각 지진파별 면진장치에 따른 응답은 4층 구조물에서의 실험결과와 유사하게 나타나고 있다.

다음으로 2층 구조물 2층 roof에 설치되어 있는 기기의 지진응답을 살펴보았다. 2층 roof에 설치되어 있는 기기는 지진응답비를 두가지로 구분하여 표현하였다. 즉 2층 바닥면에서 계측된 지진가속도를 기준으로 기기에서 계측된 지진가속도를 비교한 경우와 진동대에서 입력된 지진력을 기준

으로 비교한 경우이다. 기기가 설치되어 있는 바닥면의 지진가속도와 비교한 것이 면진장치 고유의 면진성능을 판단할 수 있는 반면 진동대 입력지진과 비교한 것은 구조물의 고유진동수를 통해서 변화된 입력지진의 효과를 반영하여 비교할 수 있다. 2층에서의 응답을 기준으로 한 비교는 표 4.15와 그림 4.14에 제시하였다.

표 4.15 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 2층 기준)

지진파	차원	2F FPS			2F HDRB			2F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	1.05	0.94	3.58	0.93	0.32	3.10	1.02	0.19	4.47
	1D02	0.70	1.22	3.28	0.63	0.22	2.56	0.63	0.24	4.37
	2D01	1.26	0.68	1.49	0.99	0.25	1.54	1.11	0.19	1.23
	2D02	0.81	0.67	1.56	0.64	0.21	1.11	0.63	0.15	0.88
	3D01	1.12	0.65	1.65	0.91	0.47	1.45	0.93	0.46	0.90
	3D02	0.79	0.59	1.50	0.50	0.37	0.96	0.55	0.35	0.87
TCU052	1D01	1.08	1.23	3.68	1.95	1.50	4.43	1.72	1.12	2.09
	1D02	0.94	1.38	1.14	1.40	0.77	1.16	1.58	0.31	1.28
	2D01	1.12	1.85	1.04	1.76	1.54	1.30	1.64	1.30	1.35
	2D02	1.11	1.04	1.63	1.53	0.56	1.54	1.74	0.29	2.32
	3D01	1.02	1.84	1.23	1.88	1.65	1.65	1.83	1.32	2.28
	3D02	1.01	1.00	1.67	1.49	1.06	1.44	1.68	1.21	1.79
NRC	1D01	0.79	0.80	1.84	0.84	0.57	1.38	1.33	0.79	3.12
	1D02	0.65	0.89	2.00	0.93	0.69	4.68	1.16	0.61	12.92
	2D01	0.85	0.90	2.48	0.80	1.02	2.70	0.96	1.27	7.09
	2D02	0.71	0.58	1.38	0.94	0.29	1.91	1.24	0.29	3.03
	3D01	0.67	0.86	1.23	0.59	0.96	1.77	0.71	1.13	2.77
	3D02	0.64	0.46	1.26	0.86	0.65	1.86	1.09	0.87	2.66

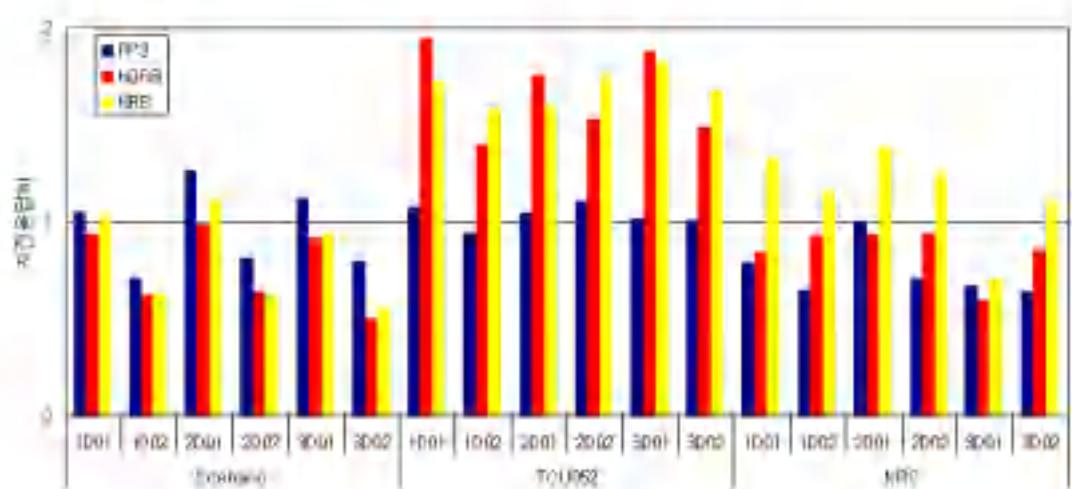


그림 4.14 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 2층 기준)

그림 4.14와 표 4.15에서 보는 바와 같이 2층에 설치되어 있는 기기의 경우는 1층에 설치되어 있는 기기에 비하여 지진력이 크게 감소된 것을 알 수 있다. 그러나 많은 경우 오히려 면진장치의 설치로 인해서 지진력이 증폭된 경우도 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 랜덤진동에 의한 실험결과를 통해서 그 이유를 분석해 볼 수 있다. 랜덤진동에 의한 실험결과를 보면 2층 구조물의 경우 7.42Hz의 고유진동수를 가지고 있으며, 2차모드에 해당하는 20Hz에서도 거의 유사한 크기의 응답을 보이고 있다는 점이다. 따라서 1차모드인 7.42Hz에서의 응답만을 생각한다면 면진효과가 4층 구조물의 경우보다 상당히 좋게 나와야 함에도 불구하고 2차모드에 의한 영향으로 면진효과가 좋게 나타나고 있지 않고 있다.

FPS의 경우는 전체의 경우에서 비교적 유사한 지진응답비를 보이고 있다. 즉 지진파에 상관없이 어느정도의 면진효과를 발휘할 수 있는 것으로 보인다. 그러나 NRB와 HDRB의 경우는 지진파에 따라서 크게 영향을 받고 있으며 두 면진장치 자체도 다른 응답을 나타내고 있다. HDRB의 고감쇠 특성에 의해서 이러한 차이가 나타나고 있는 것이다.

다음으로 2층 기기의 1층에서의 입력지진기준으로 지진응답비를 산출하여 표 4.16과 그림 4.15에 정리하였다. 구조물에서의 응답을 비교한 표 4.12에서 보는 바와 같이 NRC는 입력지진에 비하여 2층 응답이 크게되었으며, Scenario와 TCU052는 조금 증폭된 결과가 반영되었다고 할 수 있다. 그래프에서는 4층구조물의 경우와 동일하게 지진응답비를 2까지만 표시하도록 하였다.

그림과 표에서 보는 바와 같이 지진력이 구조물의 증폭현상을 통하여 증가하였기 때문에 1층의 입력을 기준으로 지진응답비를 비교한 결과는 2층의 층응답을 통해 비교한 결과보다 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

표 4.16 2층 구조물 기기 지진응답비율 (2층 기기, 1층 기준)

지진파	차원	2F FPS			2F HDRB			2F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D01	1.32	4.36	13.06	1.18	1.48	11.29	1.29	0.87	16.29
	1D02	0.96	7.01	11.84	0.86	1.24	9.25	0.86	1.41	15.80
	2D01	1.76	5.91	2.44	1.38	2.14	2.53	1.56	1.64	2.01
	2D02	1.12	6.89	2.72	0.88	2.12	1.94	0.86	1.50	1.54
	3D01	1.75	1.84	2.76	1.43	1.32	2.44	1.46	1.30	1.51
	3D02	1.25	1.35	2.63	0.79	0.85	1.68	0.87	0.81	1.52
TCU052	1D01	1.16	1.73	2.48	2.10	2.11	2.98	1.86	1.58	1.41
	1D02	1.06	3.59	1.74	1.57	2.01	1.77	1.78	0.82	1.96
	2D01	1.25	2.43	1.26	2.09	1.30	2.02	1.91	0.76	3.06
	2D02	1.15	3.02	1.39	1.59	1.62	1.31	1.81	0.84	1.98
	3D01	1.05	2.87	1.42	1.94	2.56	1.91	1.89	2.05	2.64
	3D02	1.13	1.77	1.71	1.67	1.89	1.48	1.88	2.16	1.84
NRC	1D01	1.83	2.57	3.81	1.94	1.82	2.86	3.08	2.51	6.47
	1D02	1.27	3.20	5.81	1.81	2.47	13.63	2.27	2.19	37.64
	2D01	2.05	3.09	1.47	1.92	1.87	2.18	2.86	2.06	3.16
	2D02	1.33	1.83	1.36	1.77	0.92	1.89	2.33	0.90	3.01
	3D01	2.00	1.90	1.36	1.77	2.11	1.95	2.12	2.50	3.06
	3D02	1.31	1.24	1.33	1.76	1.73	1.96	2.24	2.32	2.80

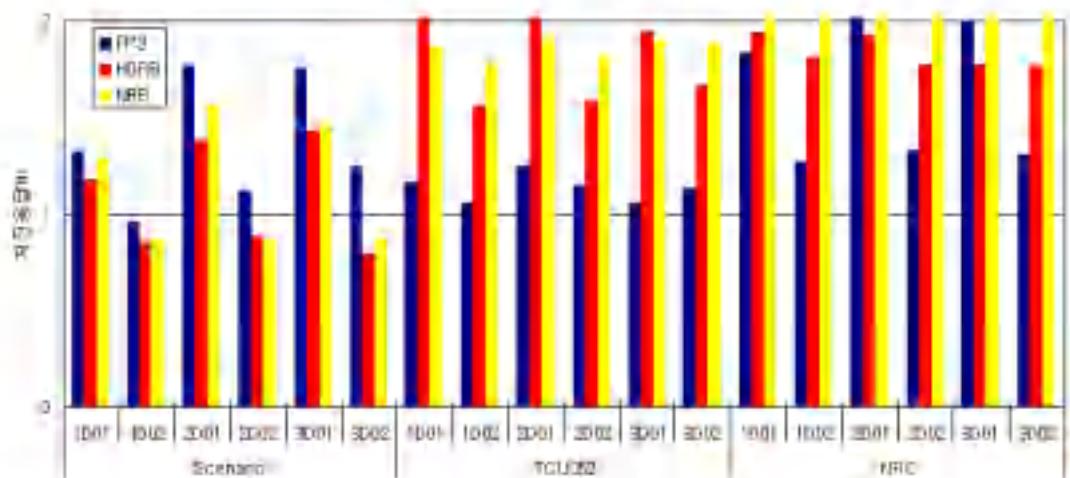


그림 4.15 2층 구조물 기기 지진응답비 (2층 기기, 1층 기준)

### 3. 시간이력 분석

2층 구조물과 6층 구조물의 경우는 4층 구조물의 경우와 달리 FPS로 면 진된 기기에 LVDT를 설치하여 층에서의 응답과 상대변위를 계측하였다. 따라서 각 기기에서 계측된 가속도 응답과 변위응답을 비교하였다.

## 가. 가속도 시간이력분석

각 면진장치별로 계측된 가속도 응답을 분석하므로서 지진파에 따른 면진장치의 거동을 분석해 보기 위하여 목표지진을 0.2g로 한 경우의 1차원 실험시 1방향 가속도 응답에 대한 분석을 수행하였다. 2층 roof에 설치되어 있는 기기를 대상으로 하였으며 floor에서 계측된 가속도응답과 각 면진기기에서 계측된 가속도 응답을 동시에 그림 4.16~4.18에서 도시하였다.

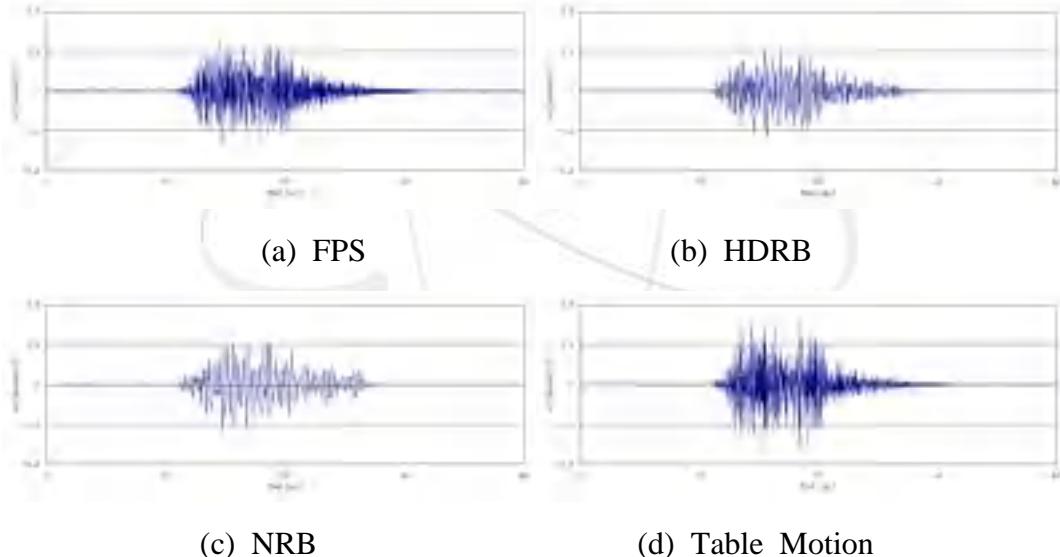


그림 4.16 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, Scenario)

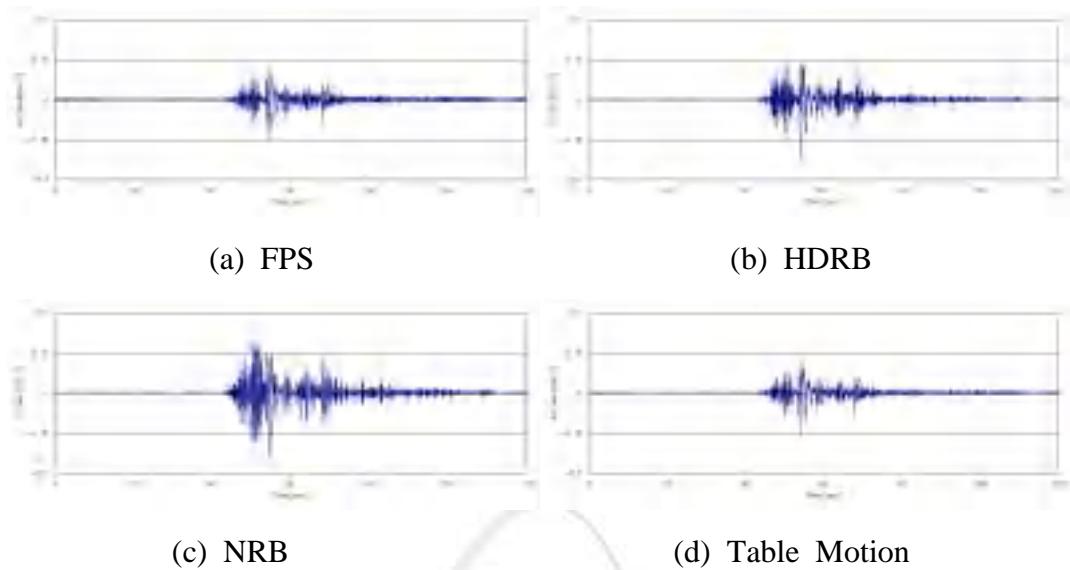


그림 4.17 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, TCU052)

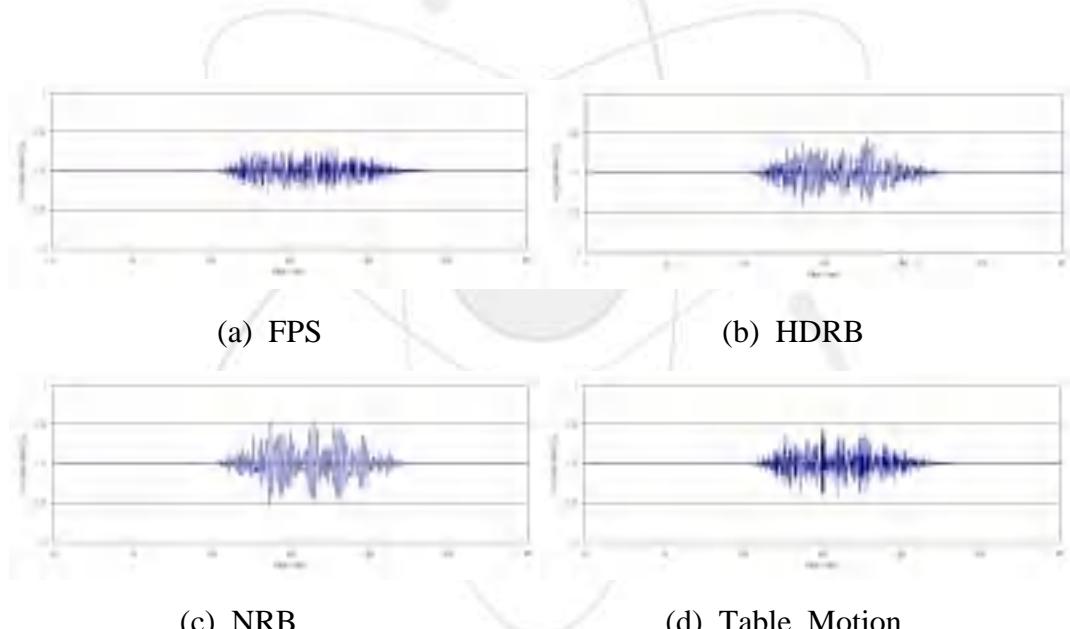


그림 4.18 2층 구조물 2층 기기의 가속도 응답 (0.2g, 1-D, NRC)

그림 4.16의 Scenario의 경우를 보면 3가지 면진장치가 모두 면진효과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. FPS의 경우는 지진력은 조금 저감시키지만 지진파 자체의 고주파 성분을 감소시켜주지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 반면 NRB와 HDRB는 고주파 성분을 많이 감소시켜주고 있으며 지진력 저감효과가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. Scenario의 탁월주

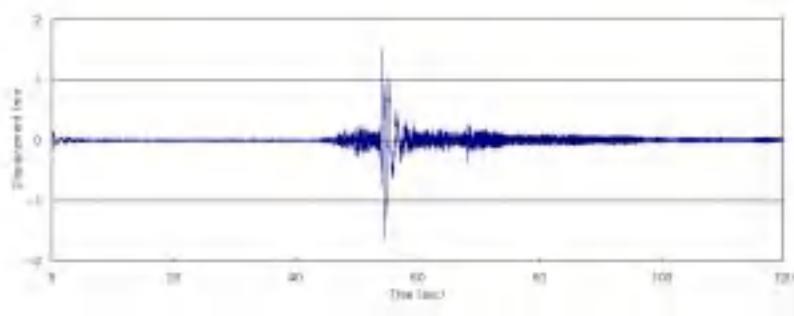
파수 대역이 고주파 성분이므로 면진효과가 우수하게 나타난 것을 알 수 있다. 특이한 것은 FPS의 경우 고유진동수를 1Hz로 설계하였음에도 불구하고 NRB와 HDRB에 비하여 지진력 저감효과가 적게 나타나는 것이다. 이러한 사항은 응답스펙트럼분석을 통하여 명확하게 알 수 있을 것이다.

그림 4.17의 TCU052의 가속도 응답을 보면 FPS의 경우는 층에서의 응답과 유사한 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 지진력이 미소하게 감소하는 것으로 보이지만 좋은 면진거동을 보이고 있다고 하기에는 어려운 상황인 것으로 판단된다. NRB와 HDRB는 오히려 지진력이 증폭이 되고 있는 것을 알 수 있다. 구조물의 고유진동수가 7Hz 이상임에도 TCU052의 경우는 탁월주파수가 1Hz 부근이므로 이러한 영향이 기기면진에 좋지 않은 영향을 미친 것으로 판단된다.

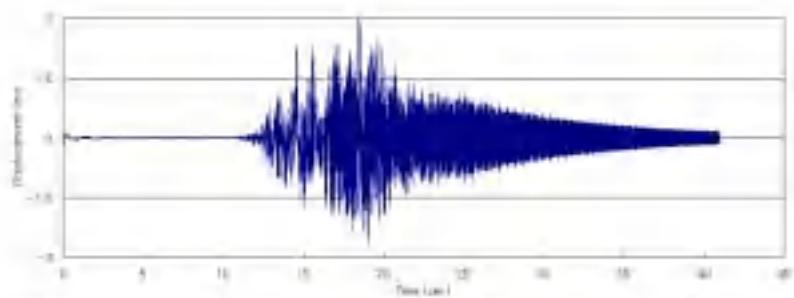
그림 4.18의 NRC의 경우도 Scenario와 유사한 경향을 보이지만 지진력 저감효과는 별로 없는 것으로 나타나고 있다. 지진파의 탁월주파수 대역이 2-7Hz에 걸쳐 있기 때문인 것으로 판단된다.

#### 나. 변위 시간이력 분석

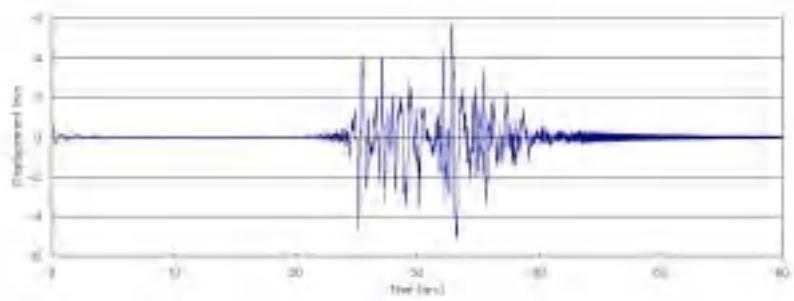
FPS의 경우는 변위-시간이력이 면진장치 거동에 중요한 의미를 가지므로 FPS가 설치되어 있는 층에 LVDT를 설치하여 층응답과 기기응답과의 상대변위를 관측하였다. 이 상대변위는 FPS의 실제변위이므로 FPS의 거동을 이해하는데에 적절한 것으로 판단된다. 그림에서는 목표지진 0.2g로 설정한 경우의 1차원 가진의 경우에 대하여만 도시하였으며 각 지진파별로 2층의 roof에 설치되어 있는 기기에 대하여 그림 4.19에 도시하였다.



(a) TCU052 지진



(b) Scenario 지진

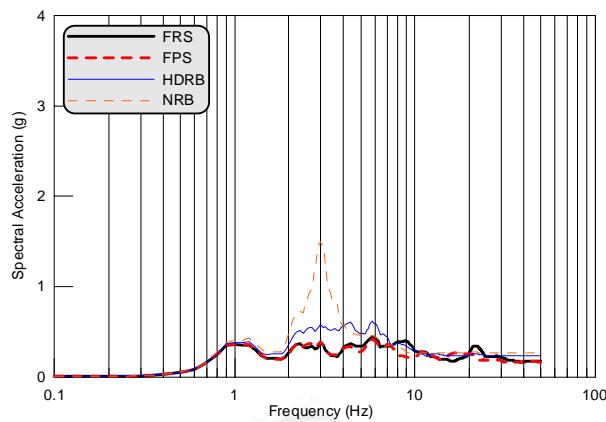


(c) NRC 지진

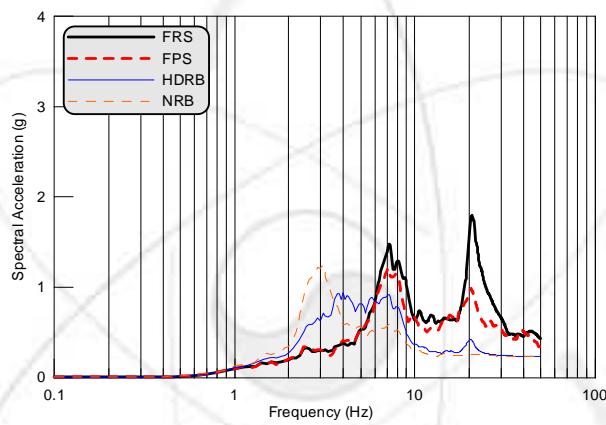
그림 4.19 2층 구조물 2층 FPS에서의 변위응답 (0.2g, 1-D)

#### 4. 응답스펙트럼 분석

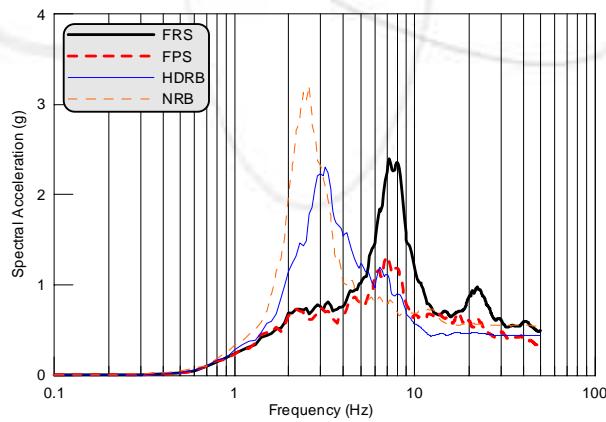
면진장치별 응답거동을 좀더 상세하게 비교하기 위하여 총응답과 각 면진기기에서의 응답을 응답스펙트럼으로 비교하였다. 이 경우도 동일하게 목표지진 0.2g, 1방향 가진의 경우에 대하여 그림 4.20에 도시하였다. 이 외의 경우는 부록에 정리하였다.



(a) TCU052 지진



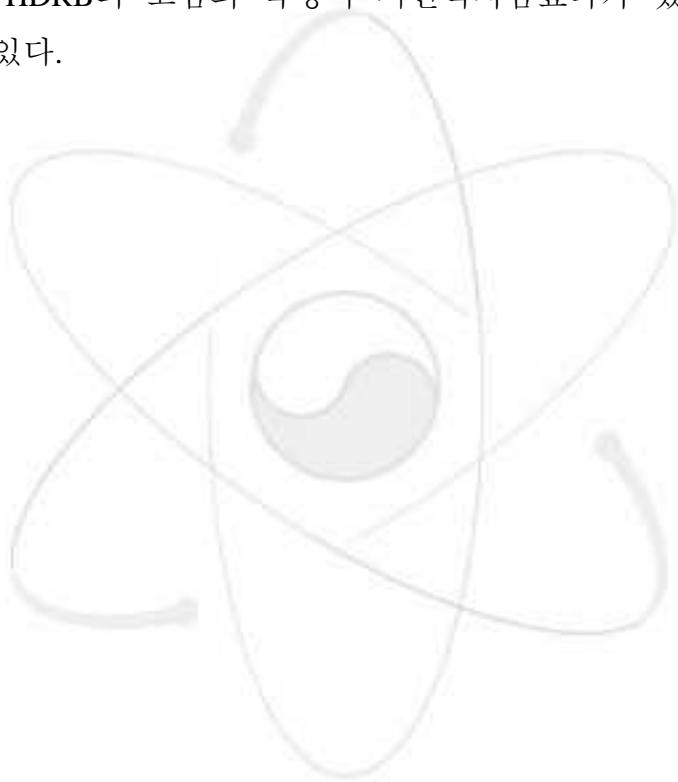
(b) Scenario 지진



(C) NRC 지진

그림 4.20 2층 구조물 2층 기기에서의 응답스펙트럼 (0.2g, 1-D)

그림에서 보는 바와 같이 Scenario와 NRC는 구조물 자체의 1차 및 2차 모드에서의 고유진동수가 명확하게 나타나고 있는 반면 TCU052의 경우는 워낙에 저주파 성분이 강하므로 고유진동수가 명확하게 나타나고 있지 않은 것을 알 수 있다. 공통적으로 FPS의 경우는 면진장치 자체의 고유진동수인 1Hz가 나타나고 있지 않은 반면 NRB와 HDRB는 면진장치 자체의 고유진동수에서 peak이 발생하므로 면진장치 자체의 특성을 알 수 있다. 이것은 면진장치 자체의 특징에 기인한 것으로 판단된다. 또한 NRB가 HDRB보다 공진주파수에서 amplitude가 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 HDRB의 고감쇠 특성이 지진력저감효과가 있음을 반영하는 것이라 할 수 있다.



## 제 5 절 고층건물 모형

일반 고층건물을 대상으로 하여 선정한 6층 구조물에 대한 실험결과를 분석하였다. 4층 및 2층 구조물과 같이 PGA분석, 지진응답비 분석 그리고 응답스펙트럼 분석을 통한 비교검토를 수행하였다.

### 1. PGA분석

먼저 목표로 설정한 PGA에 따라 실제로 진동대에 입력된 지진파의 PGA와 그에 따른 각 기기에서의 응답을 PGA만을 중심으로 정리하여 1층의 기기와 5층의 기기에 대하여 각각 표 4.17과 표 4.18에 정리하였다.

표 4.17 6층 구조물 지진응답 (1층 기기, PGA:g)

지진	차원	Table Target			Table Real			1F FPS			1F HDRB			1F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D005	0.05	-	-	0.055	0.012	0.001	0.066	0.052	0.014	0.041	0.007	0.002	0.048	0.008	0.002
	1D01	0.1	-	-	0.136	0.018	0.002	0.161	0.110	0.035	0.098	0.023	0.004	0.088	0.005	0.004
	2D005	0.05	-	0.034	0.053	0.016	0.032	0.065	0.046	0.041	0.036	0.016	0.067	0.042	0.008	0.066
	2D01	0.1	-	0.067	0.147	0.024	0.087	0.165	0.134	0.107	0.101	0.020	0.137	0.082	0.011	0.141
	3D005	0.05	0.05	0.034	0.057	0.092	0.045	0.081	0.127	0.050	0.043	0.114	0.084	0.045	0.076	0.081
	3D01	0.1	0.1	0.067	0.151	0.153	0.089	0.212	0.200	0.140	0.099	0.097	0.131	0.079	0.072	0.147
TCU052	1D005	0.05	-	-	0.041	0.011	0.001	0.044	0.021	0.007	0.076	0.011	0.003	0.087	0.009	0.003
	1D01	0.1	-	-	0.070	0.074	0.002	0.079	0.068	0.015	0.129	0.077	0.009	0.115	0.043	0.008
	2D005	0.05	-	0.022	0.043	0.010	0.021	0.045	0.026	0.023	0.081	0.012	0.053	0.089	0.006	0.041
	2D01	0.1	-	0.044	0.079	0.044	0.060	0.085	0.045	0.075	0.137	0.077	0.110	0.113	0.044	0.112
	3D005	0.05	0.04	0.022	0.036	0.058	0.021	0.044	0.061	0.023	0.080	0.089	0.045	0.061	0.118	0.053
	3D01	0.1	0.08	0.044	0.070	0.094	0.056	0.087	0.107	0.065	0.119	0.135	0.101	0.092	0.125	0.110
NRC	1D005	0.05	-	-	0.052	0.012	0.001	0.064	0.035	0.010	0.098	0.019	0.002	0.099	0.006	0.004
	1D01	0.1	-	-	0.124	0.015	0.003	0.183	0.082	0.029	0.187	0.025	0.005	0.184	0.033	0.014
	2D005	0.05	-	0.05	0.065	0.014	0.050	0.075	0.041	0.056	0.127	0.020	0.094	0.114	0.011	0.142
	2D01	0.1	-	0.1	0.124	0.043	0.126	0.167	0.093	0.142	0.188	0.054	0.261	0.181	0.056	0.323
	3D005	0.05	0.05	0.05	0.073	0.084	0.053	0.095	0.119	0.051	0.114	0.113	0.107	0.116	0.104	0.151
	3D001	0.1	0.1	0.1	0.131	0.133	0.127	0.179	0.189	0.142	0.175	0.165	0.259	0.186	0.175	0.306

표 4.18 6층 구조물 지진응답 (5층 기기, PGA:g)

지진	차원	Table Real			5F response			5F FPS			5F HDRB			5F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
NRC	1D005	0.052	0.012	0.001	0.082	0.016	0.006	0.084	0.014	0.004	0.106	0.015	0.007	0.081	0.015	0.004
	1D01	0.124	0.015	0.003	0.202	0.030	0.015	0.217	0.027	0.010	0.251	0.025	0.017	0.173	0.025	0.017
	2D005	0.065	0.014	0.050	0.114	0.027	0.082	0.113	0.025	0.096	0.151	0.026	0.188	0.112	0.021	0.245
	2D01	0.124	0.043	0.126	0.206	0.040	0.207	0.212	0.038	0.279	0.246	0.058	0.453	0.181	0.038	0.576
	3D005	0.073	0.084	0.053	0.110	0.074	0.088	0.113	0.091	0.094	0.147	0.112	0.183	0.110	0.082	0.247
	3D001	0.131	0.133	0.127	0.191	0.153	0.212	0.208	0.195	0.253	0.232	0.207	0.448	0.185	0.142	0.503
Scenario	1D005	0.055	0.012	0.001	0.039	0.018	0.004	0.042	0.007	0.006	0.044	0.008	0.007	0.044	0.012	0.006
	1D01	0.136	0.018	0.002	0.099	0.026	0.010	0.103	0.012	0.010	0.101	0.014	0.018	0.069	0.012	0.014
	2D005	0.053	0.016	0.032	0.036	0.020	0.065	0.046	0.011	0.072	0.042	0.020	0.147	0.048	0.013	0.130
	2D01	0.147	0.024	0.087	0.099	0.032	0.190	0.123	0.026	0.236	0.105	0.031	0.280	0.071	0.016	0.277
	3D005	0.057	0.092	0.045	0.039	0.071	0.093	0.059	0.055	0.094	0.050	0.112	0.183	0.040	0.082	0.244
	3D01	0.151	0.153	0.089	0.098	0.165	0.189	0.123	0.195	0.242	0.103	0.132	0.281	0.064	0.077	0.267
TCU052	1D005	0.041	0.011	0.001	0.072	0.018	0.005	0.073	0.017	0.006	0.090	0.018	0.007	0.082	0.020	0.005
	1D01	0.070	0.074	0.002	0.124	0.039	0.007	0.136	0.044	0.008	0.135	0.054	0.009	0.147	0.026	0.011
	2D005	0.043	0.010	0.021	0.069	0.020	0.033	0.071	0.019	0.036	0.088	0.021	0.080	0.040	0.021	0.063
	2D01	0.079	0.044	0.060	0.124	0.037	0.119	0.131	0.031	0.146	0.135	0.049	0.213	0.146	0.029	0.207
	3D005	0.036	0.058	0.021	0.072	0.069	0.042	0.072	0.050	0.043	0.084	0.129	0.080	0.082	0.090	0.096
	3D01	0.070	0.094	0.056	0.125	0.099	0.119	0.135	0.109	0.130	0.138	0.128	0.180	0.147	0.100	0.185

표에서 보는 바와 같이 6층 구조물의 경우에는 진동대가 실제 지진파를 구현하는 것이 2층 및 4층 구조물에 비하여 더 어려운 것을 알 수 있다. 그림 4.21에서 각 입력 지진파의 정규화된 응답스펙트럼을 비교하여 보면 PGA 뿐만 아니라 주파수 특성에서도 원하는 지진파를 구현하고 있지 못함을 알 수 있다.

구조물에서의 증폭현상을 살펴보면 예상할 수 있는 대로 구조물의 고유 진동수가 1.37Hz로서 상당히 저주파 영역에 치우쳐 있으므로 고주파 성분의 탁월한 Scenario의 경우는 입력지진보다 지진력이 감소되는 것을 알 수 있다. 그러나 NRC와 TCU052는 구조물의 고유진동수와 지진파의 탁월주파수 영역이 증폭을 일으키므로 지진력이 증폭되는 현상을 볼 수 있다.

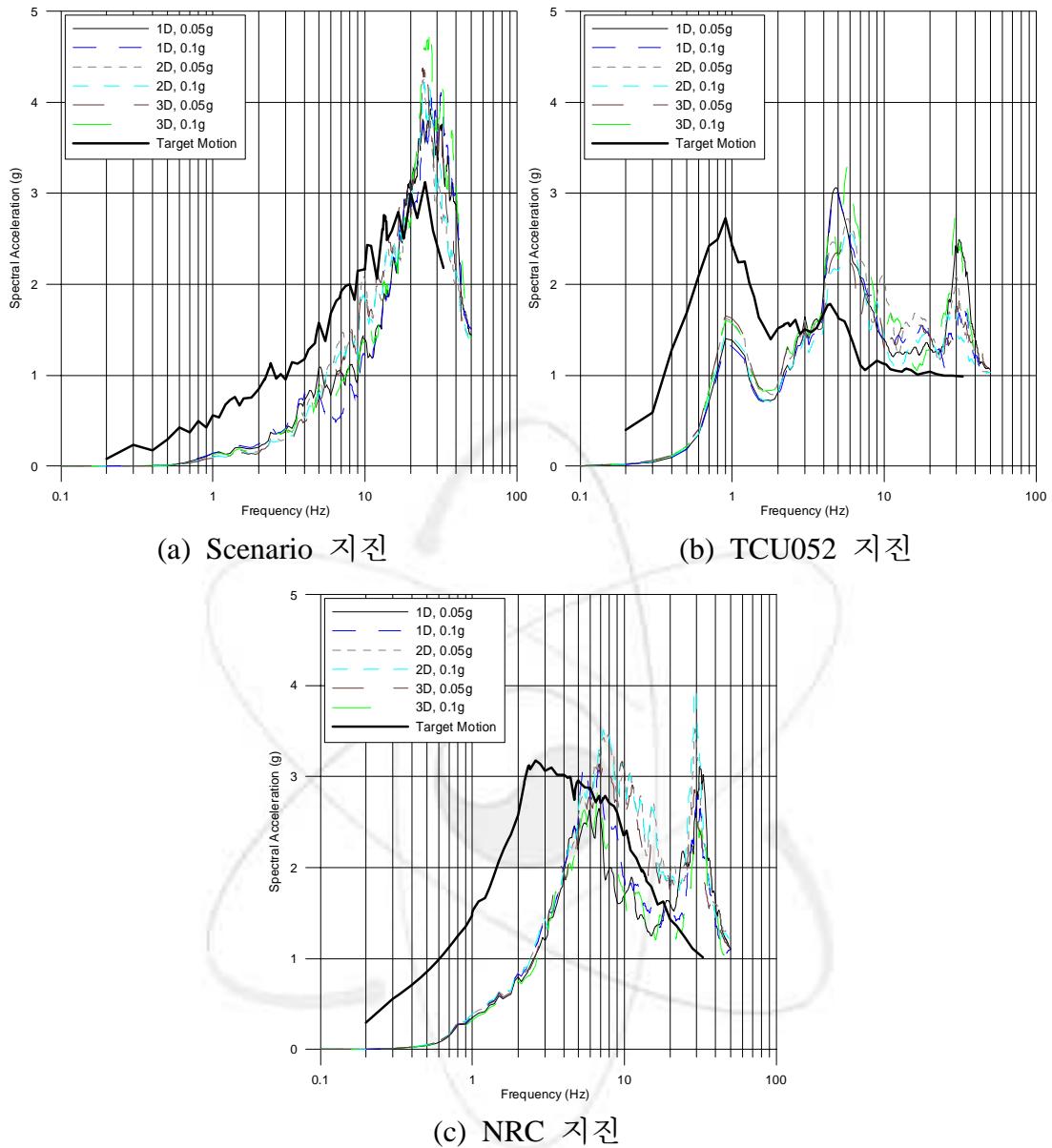


그림 4.21 입력진진의 정규화된 응답스펙트럼 (6층 구조물)

## 2. 지진응답비 분석

4층 및 2층 구조물의 경우와 동일한 방법을 이용하여 6층 구조물에 대하여 지진응답비를 산출하여 다음의 표4.19~4.21과 그림 4.22~4.24에 제시하였다.

표 4.19 6층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)

지진파	차원	1F FPS			1F HDRB			NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D005	1.19	4.19	12.45	0.75	0.59	1.73	0.87	0.61	1.45
	1D01	1.19	6.20	16.00	0.72	1.29	1.91	0.65	0.28	1.59
	2D005	1.22	2.90	1.30	0.67	0.98	2.12	0.78	0.51	2.11
	2D01	1.12	5.66	1.23	0.69	0.83	1.57	0.55	0.47	1.62
	3D005	1.42	1.38	1.11	0.74	1.23	1.88	0.79	0.83	1.80
	3D01	1.41	1.31	1.57	0.66	0.63	1.47	0.52	0.47	1.64
TCU052	1D005	1.07	1.95	5.46	1.85	0.97	2.31	2.13	0.80	2.23
	1D01	1.13	0.92	6.42	1.84	1.04	3.83	1.63	0.58	3.17
	2D005	1.05	2.61	1.09	1.89	1.17	2.54	2.07	0.63	1.99
	2D01	1.08	1.02	1.24	1.74	1.75	1.82	1.43	1.00	1.86
	3D005	1.21	1.06	1.07	2.21	1.54	2.09	1.69	2.04	2.47
	3D01	1.24	1.14	1.17	1.70	1.44	1.81	1.32	1.33	1.98
NRC	1D005	1.23	2.97	7.43	1.89	1.61	1.71	1.89	0.50	2.57
	1D01	1.48	5.48	10.96	1.50	1.64	1.96	1.48	2.22	5.35
	2D005	1.15	2.85	1.13	1.95	1.35	1.89	1.75	0.78	2.87
	2D01	1.35	2.15	1.13	1.52	1.25	2.07	1.46	1.29	2.56
	3D005	1.29	1.43	0.96	1.56	1.35	2.03	1.58	1.25	2.87
	3D01	1.37	1.42	1.11	1.34	1.24	2.04	1.42	1.32	2.41

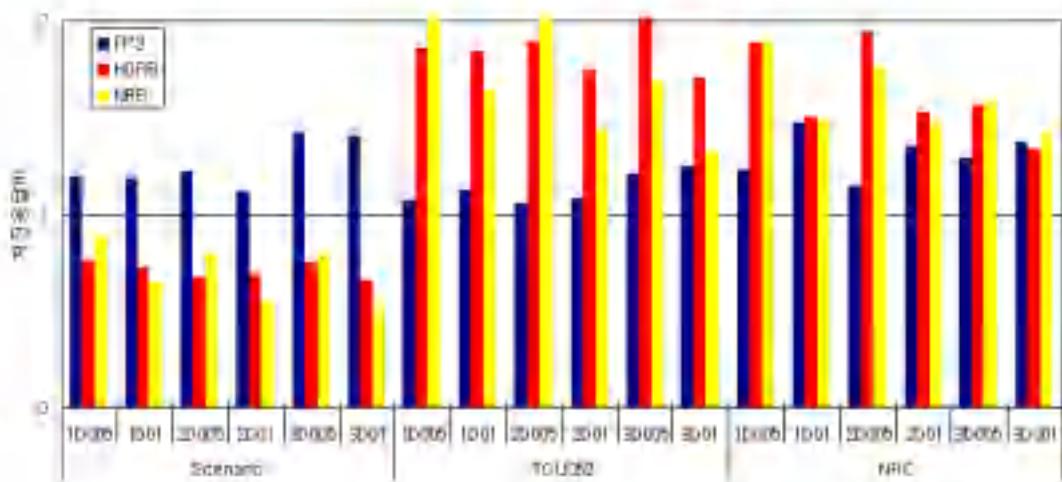


그림 4.22 6층 구조물 기기 지진응답비율 (1층 기기)

표 4.19와 그림 4.22에서 보는 바와 같이 1층 기기의 경우는 다른 구조물의 경우와 유사하게 Scenario의 경우만 면진효과가 있는 것으로 나타나고 다른 지진의 경우는 지진력이 증폭되는 현상을 보이고 있다. Scenario에서도 FPS의 고유진동수가 다른 고무베어링의 고유진동수보다도 더 작게 설계되었음에도 불구하고 FPS의 면진효과가 없는 것으로 나타나는 것은 특이할 만한 사실인 것으로 판단된다.

표 4.20 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 5층 기준)

지진파	차원	5F FPS			5F HDRB			5F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D005	1.07	0.41	1.28	1.13	0.45	1.63	1.11	0.65	1.47
	1D01	1.04	0.45	1.00	1.02	0.52	1.71	0.70	0.46	1.34
	2D005	1.28	0.58	1.09	1.17	1.03	2.24	1.32	0.65	1.98
	2D01	1.24	0.80	1.24	1.05	0.98	1.47	0.72	0.48	1.46
	3D005	1.51	0.77	1.02	1.28	1.57	1.97	1.03	1.15	2.63
	3D01	1.25	1.18	1.28	1.05	0.80	1.48	0.65	0.47	1.41
TCU052	1D005	1.00	0.94	1.18	1.25	1.01	1.49	1.14	1.07	1.04
	1D01	1.09	1.14	1.24	1.09	1.39	1.35	1.18	0.69	1.65
	2D005	1.02	0.95	1.08	1.27	1.04	2.39	0.57	1.05	1.88
	2D01	1.06	0.83	1.23	1.09	1.32	1.79	1.18	0.77	1.74
	3D005	1.00	0.72	1.01	1.17	1.87	1.89	1.14	1.30	2.28
	3D01	1.09	1.10	1.09	1.10	1.30	1.51	1.18	1.01	1.55
NRC	1D005	1.03	0.88	0.74	1.29	0.96	1.16	0.99	0.95	0.65
	1D01	1.08	0.88	0.68	1.24	0.83	1.15	0.86	0.82	1.17
	2D005	0.99	0.95	1.17	1.32	0.98	2.30	0.98	0.80	3.00
	2D01	1.03	0.93	1.35	1.20	1.44	2.19	0.88	0.94	2.79
	3D005	1.03	1.22	1.07	1.34	1.50	2.09	1.00	1.10	2.81
	3D01	1.09	1.28	1.20	1.21	1.35	2.12	0.97	0.93	2.37

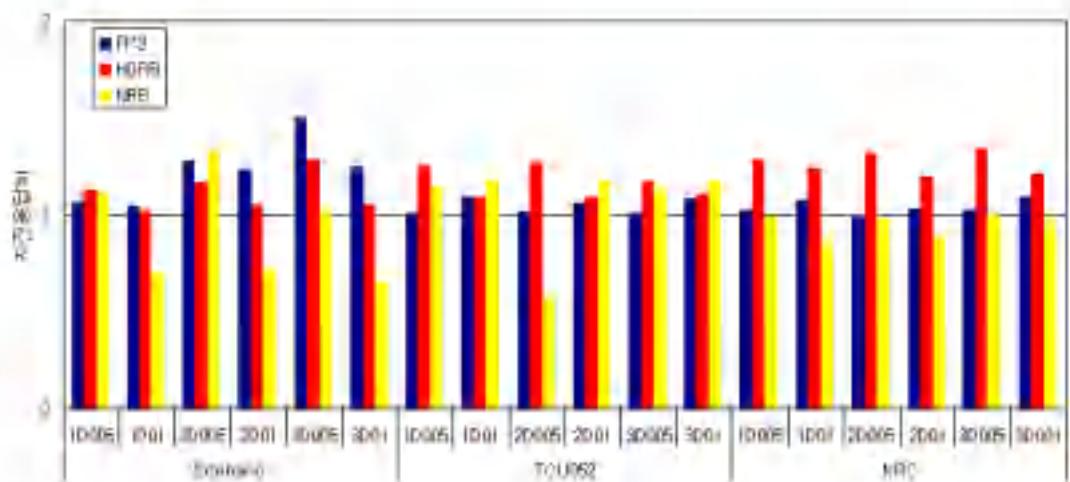


그림 4.23 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 5층 기준)

표 4.20과 그림 4.23에서는 5층에 설치되어 있는 면진기기의 지진응답비율을 5층의 층응답을 기준으로 나타내고 있다. 5층 기기에 대한 응답을 보면 이전의 4층과 2층 구조물에서의 응답과는 상이한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 면진장치와 지진파에 의한 차이가 적게 나타나고 있는 것이다. 구조물의 고유진동수가 워낙 저주파수이므로 저주파수 영역에서 증폭이 발생해서 면진장치와 공진을 일으키므로 면진효과를 나타내는 것은 어려운 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 지진응답비가 1부근에서 유사한 값을 보이고 있는 것은 특이한 현상인 것으로 보인다. 이러한 결과들은 각 면진기기의 응답에 대한 시간이력응답과 응답스펙트럼 분석을 통하여 분명히 할 수 있을 것으로 판단된다. 지진파에 의한 차이는 나타나고 있지 않지만 전반적으로 HDRB의 면진효과가 가장 낮게 나타나고 있는 것은 구조물의 2차모드에서 증폭에 의한 것으로 판단된다. 이러한 사항은 응답스펙트럼의 분석을 통해서 확실히 판단할 수 있을 것이다.

다음으로는 동일한 5층 기기에 대한 지진응답 비율을 1층의 table 입력을 기준으로 하여 표 4.21과 그림 4.24에서 제시하였다.

표 4.21 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 1층 기준)

지진파	차원	5F FPS			5F HDRB			5F NRB		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D005	0.76	0.60	5.00	0.81	0.65	6.36	0.80	0.94	5.73
	1D01	0.76	0.67	4.73	0.74	0.76	8.09	0.51	0.68	6.32
	2D005	0.88	0.72	2.27	0.80	1.28	4.65	0.90	0.82	4.12
	2D01	0.83	1.10	2.70	0.71	1.33	3.21	0.48	0.66	3.18
	3D005	1.02	0.60	2.09	0.87	1.21	4.06	0.70	0.89	5.41
	3D01	0.81	1.27	2.72	0.68	0.86	3.15	0.43	0.51	2.99
TCU052	1D005	1.77	1.59	4.46	2.21	1.70	5.62	2.01	1.81	3.92
	1D01	1.93	0.60	3.42	1.92	0.73	3.71	2.10	0.36	4.54
	2D005	1.64	1.95	1.74	2.05	2.13	3.84	0.92	2.15	3.02
	2D01	1.66	0.70	2.42	1.71	1.11	3.54	1.85	0.65	3.44
	3D005	2.00	0.85	1.99	2.33	2.23	3.72	2.26	1.54	4.49
	3D01	1.95	1.16	2.33	1.98	1.36	3.24	2.11	1.06	3.32
NRC	1D005	1.62	1.17	3.00	2.03	1.27	4.71	1.56	1.26	2.64
	1D01	1.75	1.77	3.92	2.02	1.67	6.62	1.39	1.67	6.69
	2D005	1.73	1.76	1.93	2.32	1.80	3.81	1.72	1.48	4.96
	2D01	1.72	0.87	2.22	1.99	1.35	3.59	1.46	0.88	4.57
	3D005	1.54	1.09	1.79	2.01	1.34	3.48	1.50	0.98	4.69
	3D001	1.59	1.47	2.00	1.77	1.56	3.53	1.41	1.07	3.96

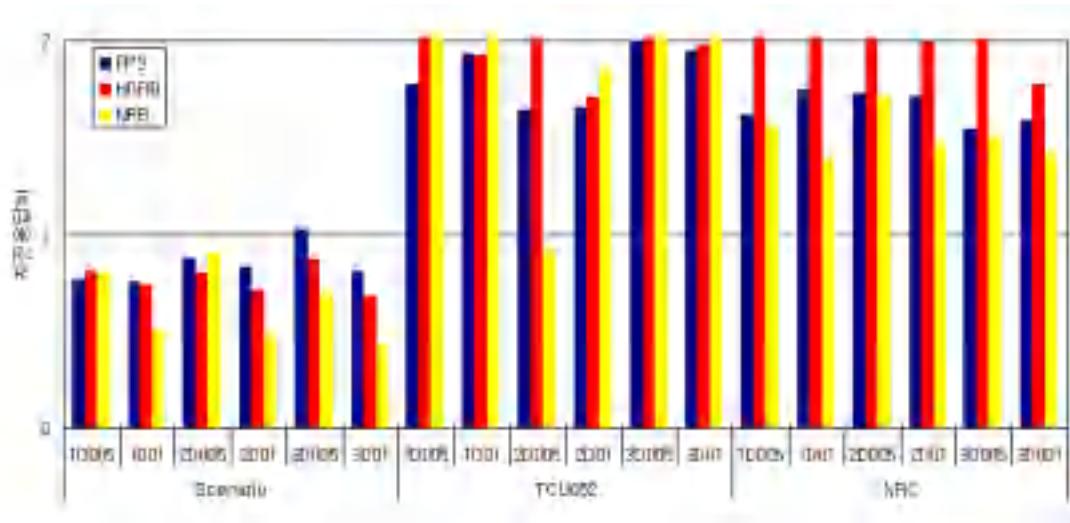


그림 4.24 6층 구조물 기기 지진응답비율 (5층 기기, 1층 기준)

표와 그림에서 보는 바와 같이 Scenario의 경우는 지진력이 오히려 감소되었기 때문에 전체적으로는 면진효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 이것은 면진장치에 의한 면진효과는 아니고 구조물 자체의 고유진동 특성에 의하여 지진력이 감소된 효과에 기인한 것이다.

### 3. 시간이력 분석

전술한 바와 같은 방법으로 각 기기에서 계측된 가속도 응답과 변위응답을 비교하였다.

#### 가. 가속도 시간이력분석

각 면진장치별로 계측된 가속도 응답을 분석하므로서 지진파에 따른 면진장치의 거동을 분석해 보기 위하여 목표지진을 0.1g로 한 경우의 1차원 실험시 1방향 가속도 응답에 대한 분석을 수행하였다. 5층에 설치되어 있는 기기를 대상으로 하였으며 floor에서 계측된 가속도응답과 각 면진기기에서 계측된 가속도 응답을 동시에 그림 4.25~4.27에서 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 6층 기기에서 계측된 가속도 응답은 이전의 2층과 4층 구조물에서 계측된 가속도 응답과 비교하여 매우 다른 형태의 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 앞의 지진응답비에서도 면진장치와 지진파에 따른 영향이 거의 없었던 것과 마찬가지로 가속도 응답에서도 지진파와 면진장치에 따른 응답거동의 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 지진파에 따라 파형의 차이는 약간 있지만 진동 초기에 움직임이 있은 후 후반부에서는 모든 경우 면진기기가 자유진동하는 형상을 보여주고 있는 것이다. 구조물 자체의 고유진동수가 이와 같이 저주파 성분이 탁월할 경우에는 기기면진의 어려움을 보여주고 있는 것으로 판단된다. 구조물의 진동수가 1Hz 부근일 경우에는 적절한 기기면진을 위해서는 0.5Hz 미만의 고유진동수를 가지는 면진장치를 설계해야 하는데 그러기에는 기기의 중량이 너무 작기 때문에 현실적으로 그러한 면진장치를 설계하는 것이 불가능하기 때문에 상부중량의 영향을 받지 않는 FPS와 같은 면진장치를 설치하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또는 실제로 적용이 용이한 강성이 적은 스프링 요소를 이용한 면진도 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

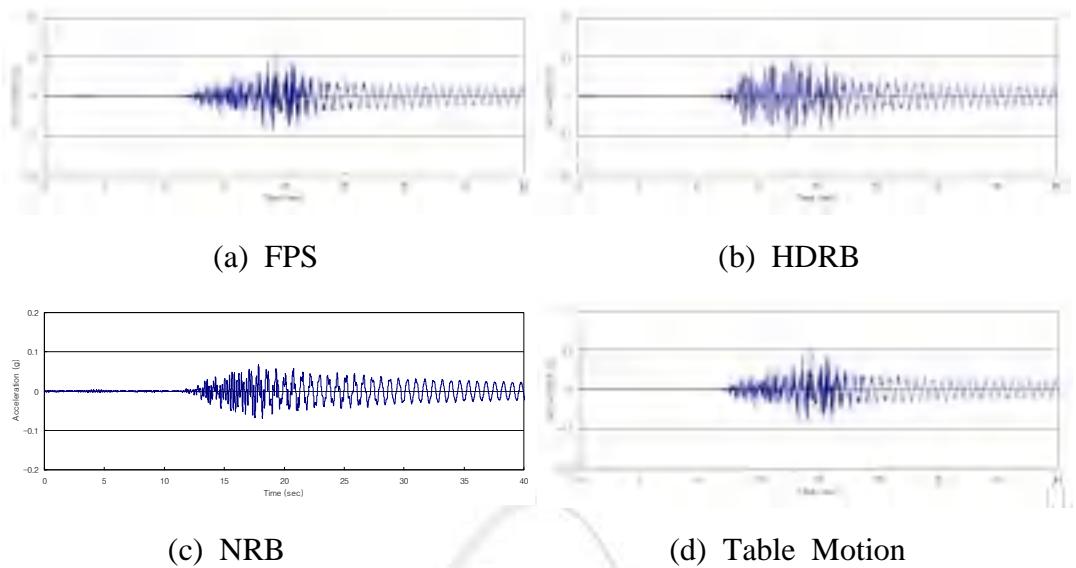


그림 4.25 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, Scenario)

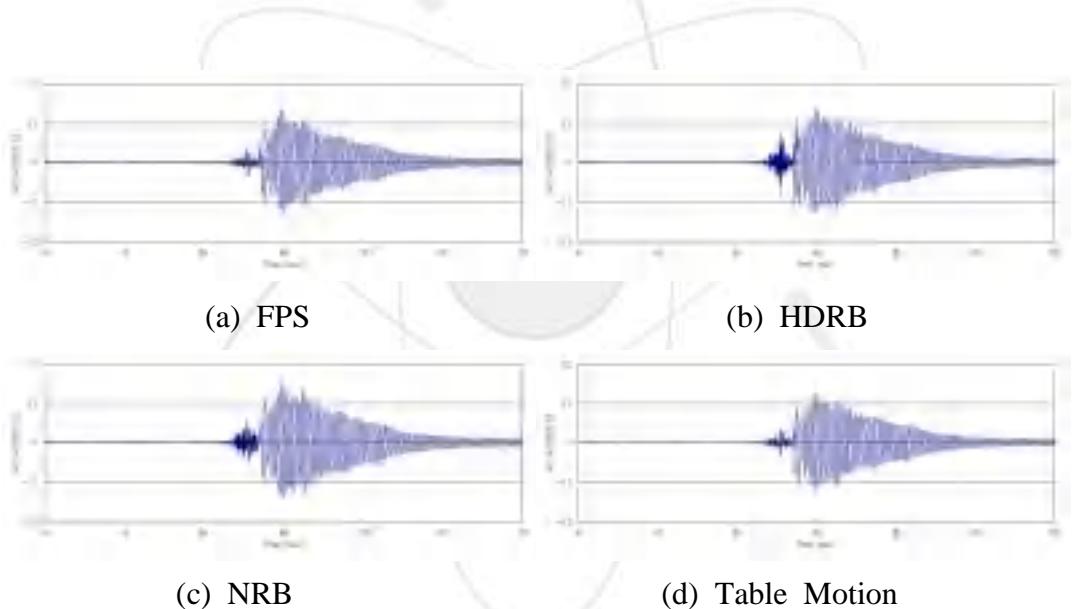


그림 4.26 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, TCU052)

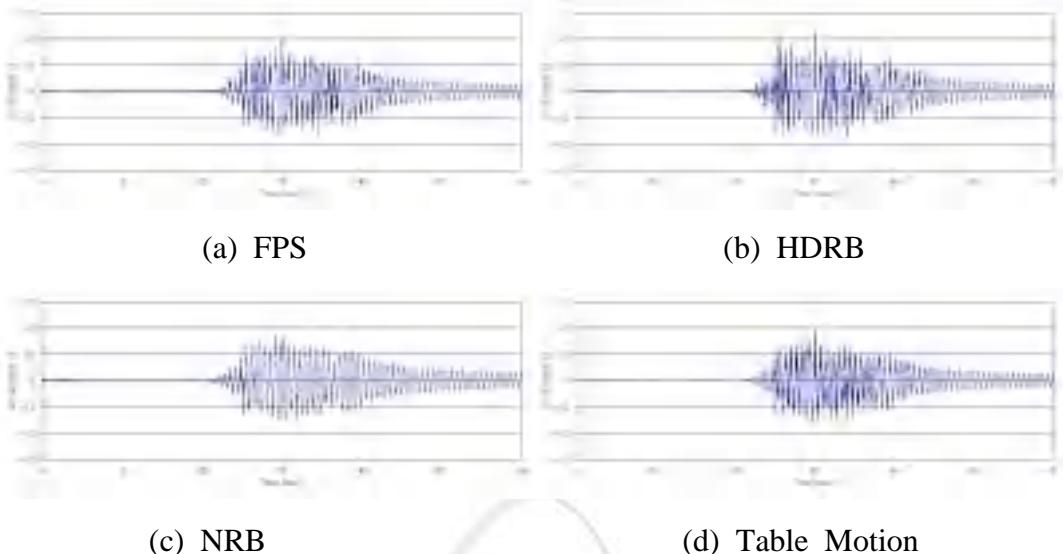
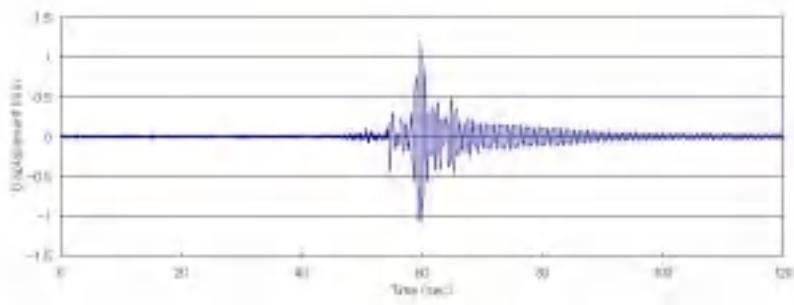


그림 4.27 6층 구조물 5층 기기의 가속도 응답 (0.1g, 1-D, NRC)

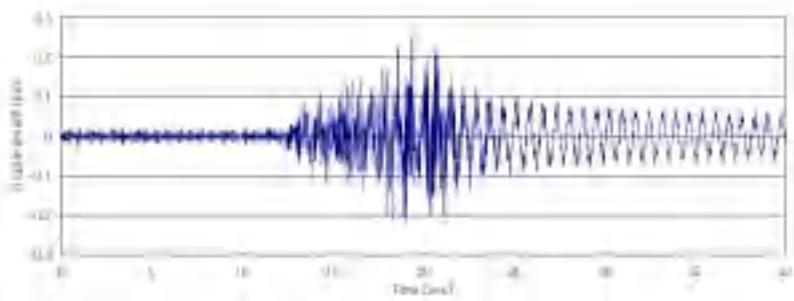
#### 나. 변위 시간이력 분석

FPS의 경우는 변위-시간이력이 면진장치 거동에 중요한 의미를 가지므로 FPS가 설치되어 있는 층에 LVDT를 설치하여 층응답과 기기응답과의 상대변위를 관측하였다. 이 상대변위는 FPS의 실제변위이므로 FPS의 거동을 이해하는데에 적절한 것으로 판단된다. 그림에서는 목표지진 0.1g로 설정한 경우의 1차원 가진의 경우에 대하여만 도시하였으며 각 지진파별로 5층에 설치되어 있는 기기에 대하여 그림 4.28에 도시하였다.

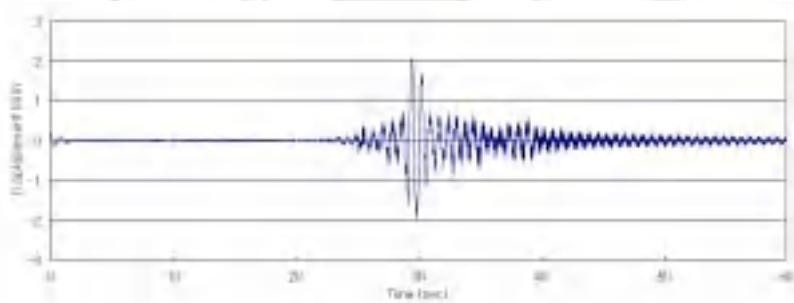
그림에서 보는 바와 같이 FPS로 면진한 기기가 층과의 상대변위가 크게 발생하고 있지는 않다. 다만 지진파에 따른 면진기기의 거동을 볼 수 있고 가진 후반부에서는 가속도 응답과 마찬가지고 기기가 자유진동하는 모습을 관찰할 수 있다.



(a) TCU052 지진



(b) Scenario 지진



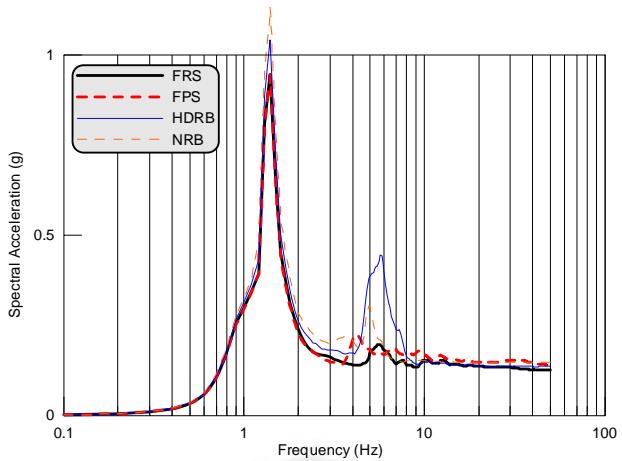
(c) NRC 지진

그림 4.28 6층 구조물의 5층 FPS에서의 변위응답 (0.1g, 1-D)

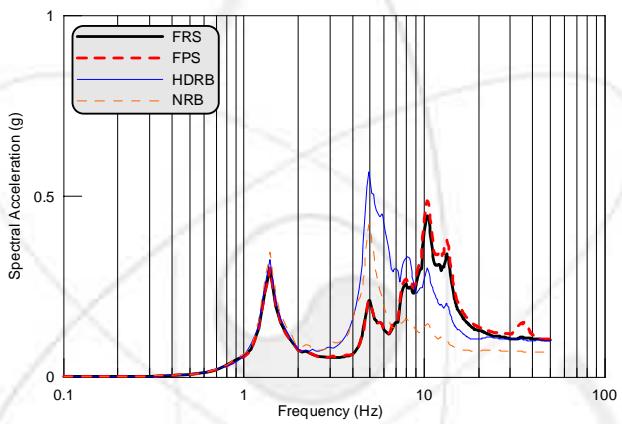
#### 4. 응답스펙트럼 분석

면진장치별 응답거동을 좀더 상세하게 비교하기 위하여 총응답과 각 면진기기에서의 응답을 응답스펙트럼으로 비교하였다. 이 경우도 동일하게 목표지진 0.2g, 1방향 가진의 경우에 대하여 그림 4.6에 도시하였다. 이 외의 경우는 부록에 정리하였다.

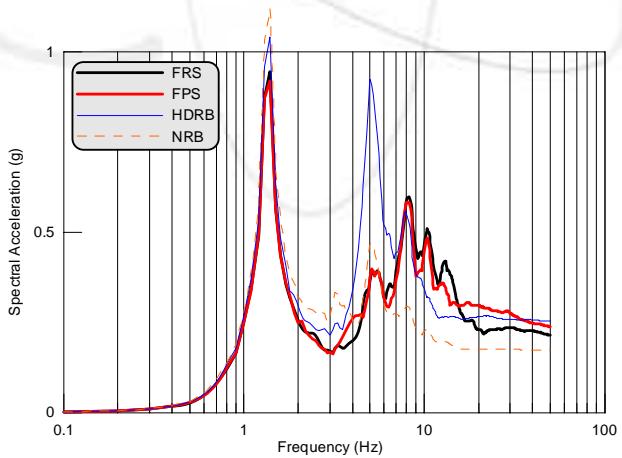
그림에서 보는 바와 같이 6층 구조물의 경우는 구조물의 저진동수 특성이 전체 기기의 응답에 크게 반영되고 있음을 알 수 있다. 특이한 사실은 5-6Hz 부근에서 HDRB의 응답이 크게 나타나고 있는 것인데 이러한 영향이 전체적으로 HDRB의 지진응답비가 높게 나오도록 한 요인인 것으로 판단된다. HDRB의 고유진동수가 3-4Hz 부근인 것으로 판단되며 이 고유진동수가 구조물의 2차모드인 5Hz에서 영향을 받아 큰 응답을 일으킨 것이다.



(a) TCU052 지진



(b) Scenario 지진



(C) NRC 지진

그림 4.29 6층 구조물 2층 기기에서의 응답스펙트럼 (0.2g, 1-D)

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 원전기기의 내진안정성 향상기법의 개발을 위한 진동대 실험을 수행하였다. 대상구조물로는 원전의 격납건물을 대상으로 한 4층 구조물과 원전 보조건물을 대상으로 한 2층 구조물 그리고 일반 고층건물을 대상으로 한 6층 구조물을 설계 제작하여 실험에 사용하였다. 진동대 실험을 위한 지진파로는 US NRC Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 원전을 위한 설계응답스펙트럼과 국내 원전부지의 시나리오 지진의 스펙트럼을 이용한 인공지진 그리고 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 TCU052 site에서 계측된 지진파를 사용하였다. 실험에 사용한 세가지 구조물은 각각 고유진동수가 1Hz, 4Hz 그리고 7Hz 부근이 되도록 제작하였다. 면진기기를 나타내기 위하여 400Kg의 강체를 사용하였으며, 면진장치로는 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무베어링(HDRB) 그리고 마찰진자형 베어링(FPS)를 선택하여 사용하였다. 따라서 주파수 특성이 다른 구조물과 지진파를 사용하였을 경우 각 면진장치에 따른 기기면진 효과를 알 수 있도록 하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

### 특성시험에 의한 결론

- NRB와 HDRB에 대한 특성시험 결과 HDRB의 감쇠비가 NRB의 경우에 비해 크게 평가되는 것을 알 수 있었다. 변형률이 큰 경우에는 두 경우의 차이가 감소하지만 감쇠비가 NRB에 비해서 크게 나타나므로 저중량의 소형기기면진에는 HDRB를 사용하는 것이 효과적일 수 있음을 알 수 있었다.
- 형상계수가 너무 작은 고무베어링의 사용은 올바른 전단변형을 저해하고 흔변형에 의한 거동을 유발시킬 수 있는 것으로 나타났다. 변형률이 작은 경우에는 이러한 영향이 크게 나타나지 않지만 변형률이 큰 경우에는 흔변형에 의한 거동이 두드러지게 나타나므로 기기면진시 이러한 영향에 대한 세심한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

- FPS에 대한 특성시험 결과 마찰면의 곡률반경이 작을 경우 PTFE의 마찰에 의한 저항에 수평분력에 의한 저항이 추가되면서 동일 변형에 대해 수평하중이 크게 평가되는 것을 알 수 있었다. 따라서 소규모 FPS의 설계시는 마찰면 곡률에 의한 영향을 검토하여야 함을 알 수 있었다.

### 구조물에 따른 결론

- 구조물에 따른 진동대 실험결과 구조물에 따라서 진동수 특성이 다르므로 충응답에 큰 영향을 미치고 이것은 면진장치별 면진효과에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특별히 고유진동수가 낮은 구조물의 경우 면진장치의 특성을 나타내지 못하는 결과를 얻을 수 있었다.

### 지진파에 따른 결론

- 국내 원전부지의 특성을 고려하여 개발된 인공지진을 이용한 진동대 실험결과 개발된 지진의 탁월주파수 영역이 20Hz 이상의 고주파수 성분이므로 구조물에 상관없이 모든 경우에 면진효과가 우수하게 나타났다.
- 근거리 지진의 특성인 저주파수 지진의 경우 면진효과를 얻기가 쉽지 않은 것으로 나타났다. 이러한 지진은 국내를 비롯하여 많은 내진설계기준에서 제안하고 있는 설계응답스펙트럼의 주파수 범위와 같지 않으므로 향후 내진설계시 주의가 필요한 것으로 판단된다.
- PGA의 변화에 따른 면진효과에 대한 분석결과 본 실험에서 수행한 범위에서는 PGA가 면진효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 비선형성이 강한 면진장치를 실제로 적용하여 더 큰 PGA에서 실험할 경우에는 그 결과가 달라질 수도 있을 것으로 판단된다.

### 면진장치에 따른 결론

- FPS의 경우는 목표로 한 고유진동수가 잘 나타나지 않으며, 따라서 주파수 영역에 크게 영향 받지 않고 전 영역에서 고른 지진력 저감효과를 나타냈다. 지진력이 상대적으로 작은 경우에는 초기강성의 영향으로 인하여 지진력이 오히려 증폭이 되는 현상이 나타났으나 지진력이 증가하

면서 지진력 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 면진효과는 고무 베어링에 비하여 상대적으로 작으며, 지진력이 증가할 경우에는 범위한 계의 결정이 지진력저감에 중요한 요소임을 알 수 있었다.

- NRB와 HDRB를 사용한 진동대 실험결과 두가지 면진장치 모두 기기면 진시 지진력 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 다만 발생가능한 지진의 주파수 범위와 면진하고자 하는 기기의 고유진동수 그리고 면진기기의 구조물내의 위치에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으므로 이러한 영향을 세심하게 검토하여 설계하는 것이 필요한 것으로 판단된다.
- 고감쇠고무의 감쇠특성이 면진장치와 지진파가 공진을 일으키는 영역에서는 지진력을 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 지진파의 탁월주파수 영역과 일치하지 않는 경우는 고감쇠특성이 오히려 지진력 저감효과를 저해하는 요인으로 나타나는 것을 알 수 있다. 결과적으로 고감쇠고무의 특성이 면진장치의 감쇠효과를 증가시키므로 인하여 소형기기의 면진에 효과적일 수 있음을 보였다.

본 연구를 통하여 구조물 내부에 존재하는 소형기기의 면진이 가능함을 보였다. 따라서 지진파와 구조물에 따른 적절한 설계가 이루어진다면 면진장치를 이용하여 20-50% 정도의 기기면진효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

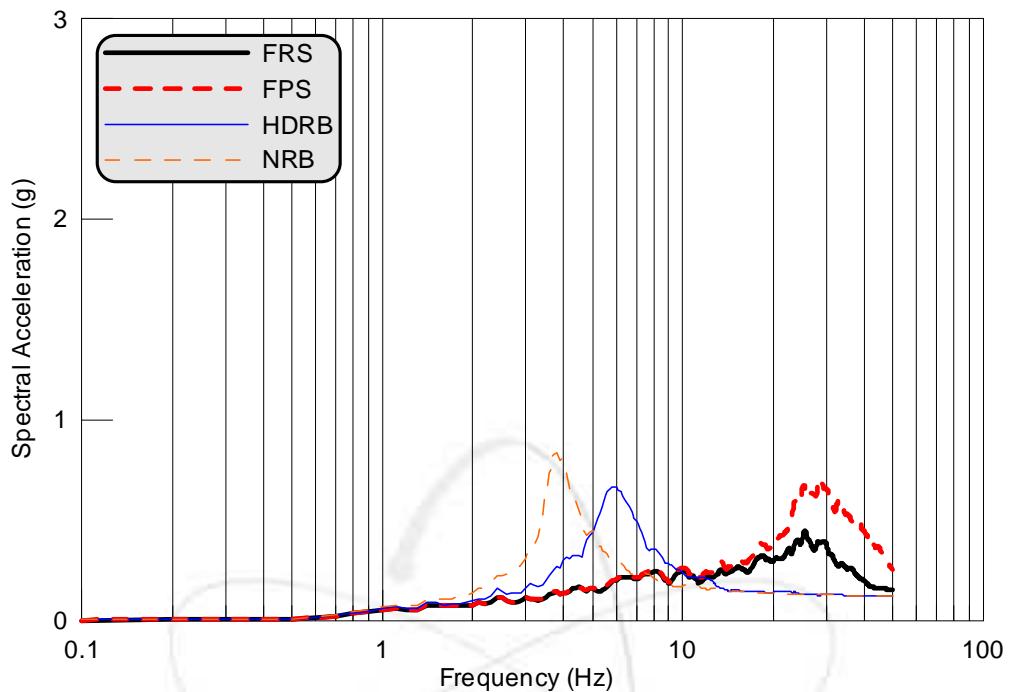
1. US NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
2. Takeda, M., Ohkawa, Y. and Akutsu, Y., "An Evaluation Method for Seismic isolation Effect in Siting of a Nuclear Facility," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 62, 1998, pp. 241-249.
3. Ersoy, S., Ala Saadeghvaziri, M., Liu, G.Y., and Mau, S.T., "Analytical and Experimental Seismic Studies of Transformers Isolated with Friction Pendulum System and Design Aspects," *Earthquake Spectra*, 17(4), 569-595, 2001.
4. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박칠립, □□적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가,□□ **한국지진공학회 논문집**, 제2권, 제4호, 1998, pp. 53-62.
5. 유봉, 이재한, 구경희, 권혁신, □□금속로 면진설계를 위한 축소규모 납 삽입 및 3차원 면진베어링의 특성시험 결과분석,□□KAERI/TR-1362/99, 한국원자력연구소, 1999.
6. 전영선, 최인길, 유문식, □□수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가,□□ **한국지진공학회 논문집**, 제5권, 제6호, 2001, pp. 1-10.
7. Zayas, V., Low, S., Bozzo, L. and Mahin, S., □□Feasibility and Performance Studies on Improving the Earthquake Resistance of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System,□□ UCB/EERC-89/09, University of California, Berkeley, 1989.
8. 김영중, 허영철, 김병현, □□마찰진자형 면진베어링의 특성연구,□□**한국지진공학회 2000년도 추계학술발표회 논문집**, 2000.
9. 이경진, 김갑순, 서용표, □□FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가,□□ **2003 추계학술발표회 논문집**, 한국원자력학회, 2003.
10. 김대곤, 김우범, 서용표, 문대식, 김종엽, □□FPS로 면진된 원전 주제어

실의 내진성능 평가,□□ 한국지진공학회 2003년도 추계학술발표회 논문집, 2003.

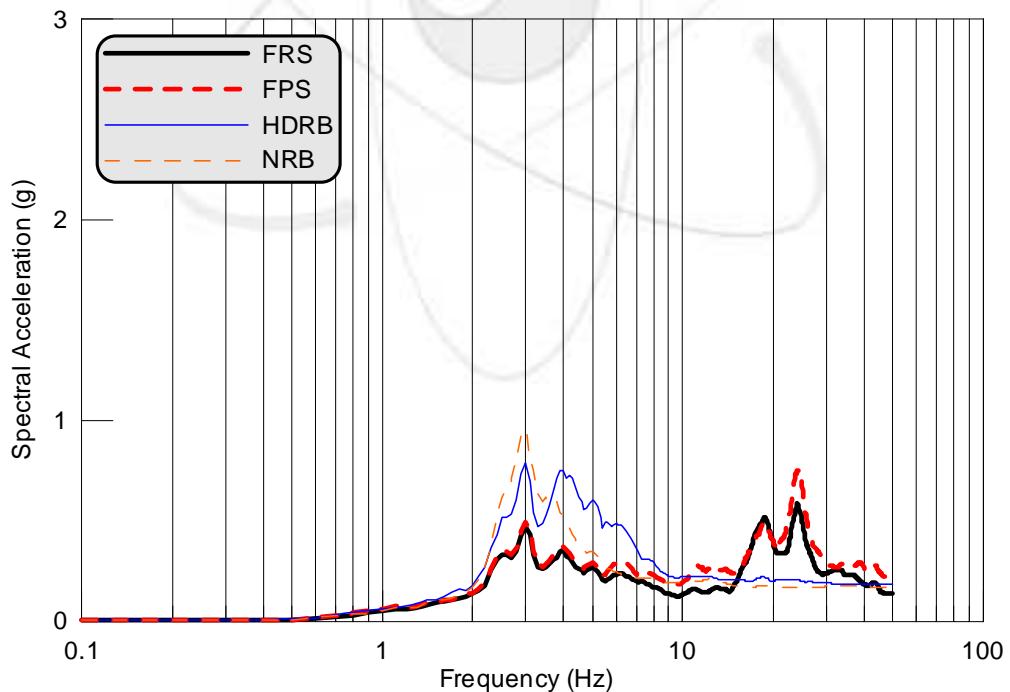
11. Kelly, J.M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer, 1997.
12. Hwang, J.S. and Ku., W, □□Analytical Modeling of High Damping Rubber Bearings,□□ *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 8, August 1997.
13. Watanabe, Y., Kato, A., Somaku, T., Umeki, K. and Sato, N., □□Table Test and Analysis on Base Isolated FBR Plant Model with High-Damping Rubber Bearing,□□ *12th WCEE*, 2000.
14. Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J., □□Dynamic Behavior and Seismic Performance of Base-Isolated Bridge in Observed Seismic Record,□□*12th WCEE*, 2000.
15. PEER Strong Motion Database, <http://nisee.berkeley.edu/>
16. 월성원자력 2,3,4호기 최종안전성 분석 보고서, 한국전력공사
17. *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.
18. 日本免震構造協會, 免震部材 JSSI 規格, 1997.
19. 日本免震構造協會, 免震積層고무入門, 1997.

## 부 록

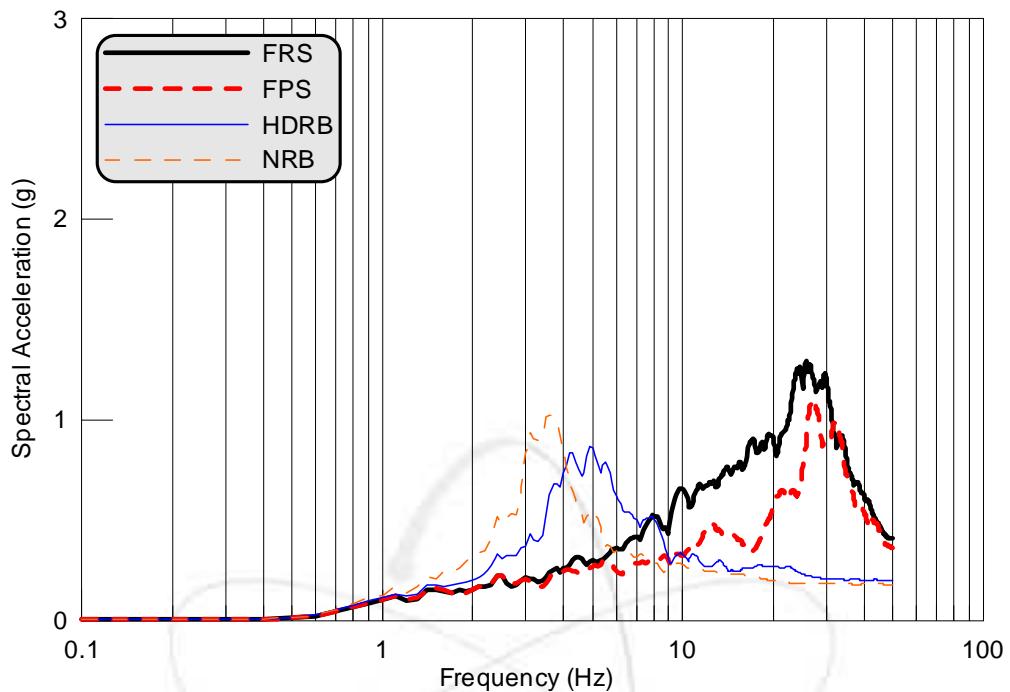
- A. 격납건물 모형(4층) 구조물 실험결과 그래프
- B. 보조건물 모형(2층) 구조물 실험결과 그래프
- C. 고층건물 모형(6층) 구조물 실험결과 그래프



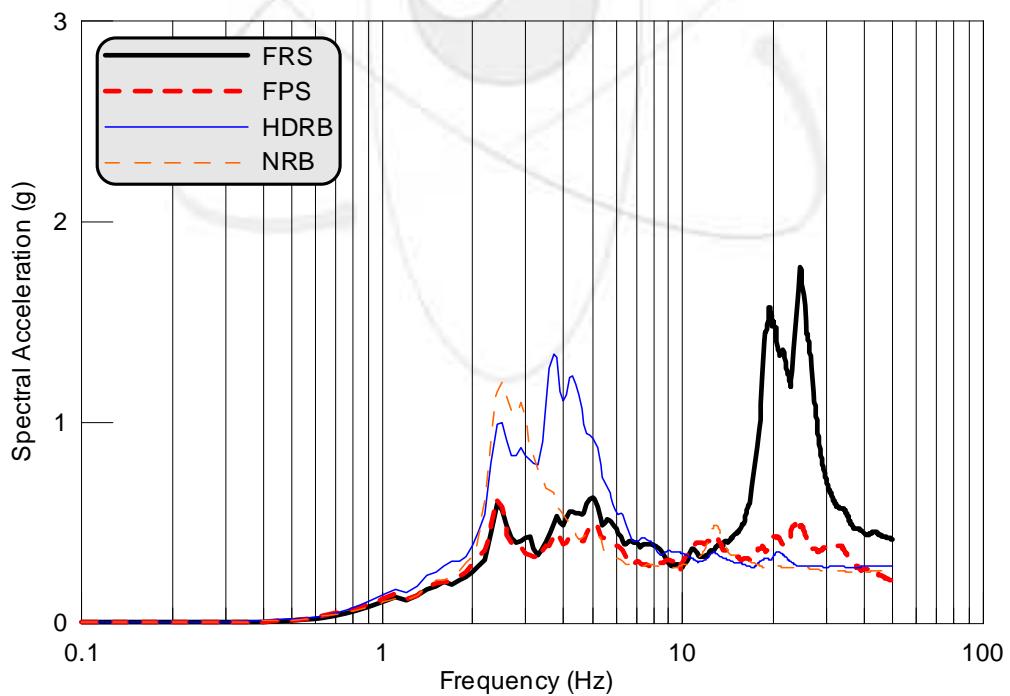
A.1 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario A.1, 1D, 0.1g)



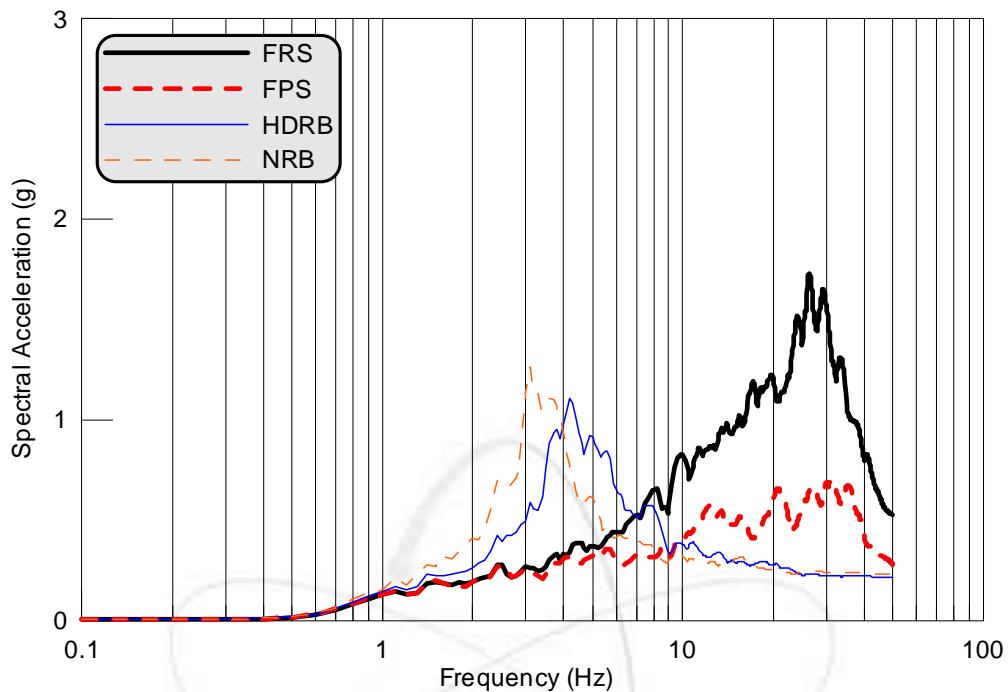
A.2 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario A.2, 1D, 0.1g)



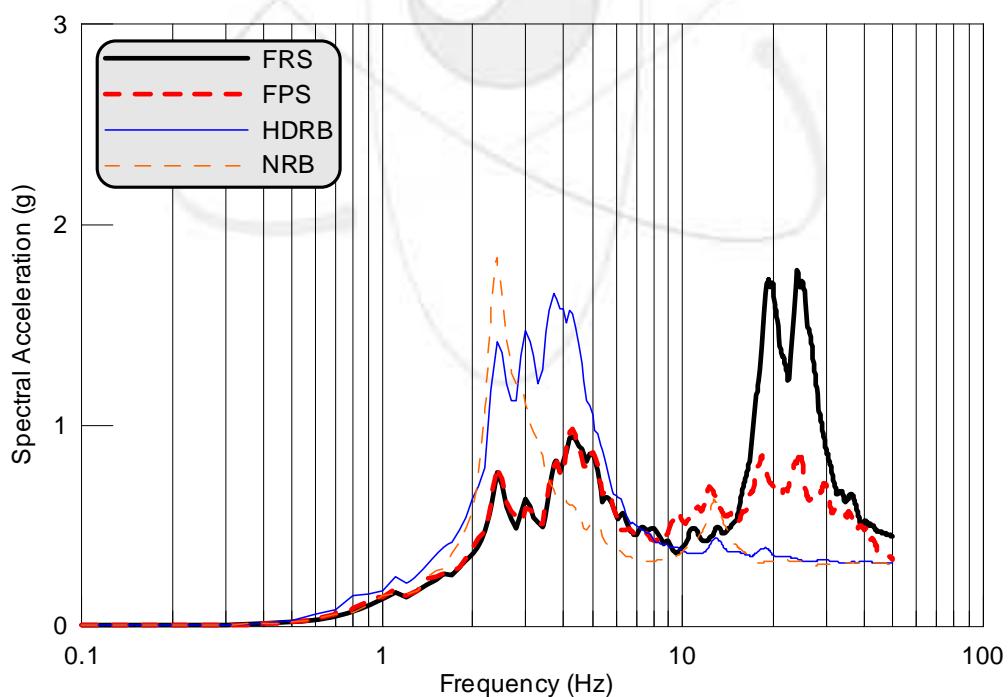
A.3 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario A.3, 1D, 0.2g)



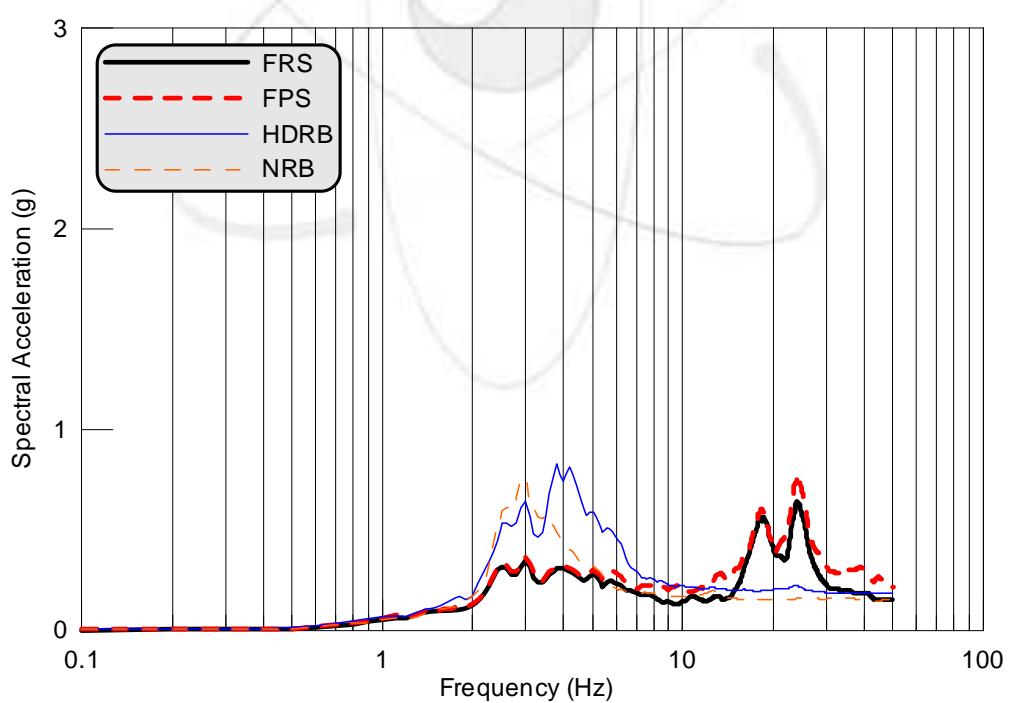
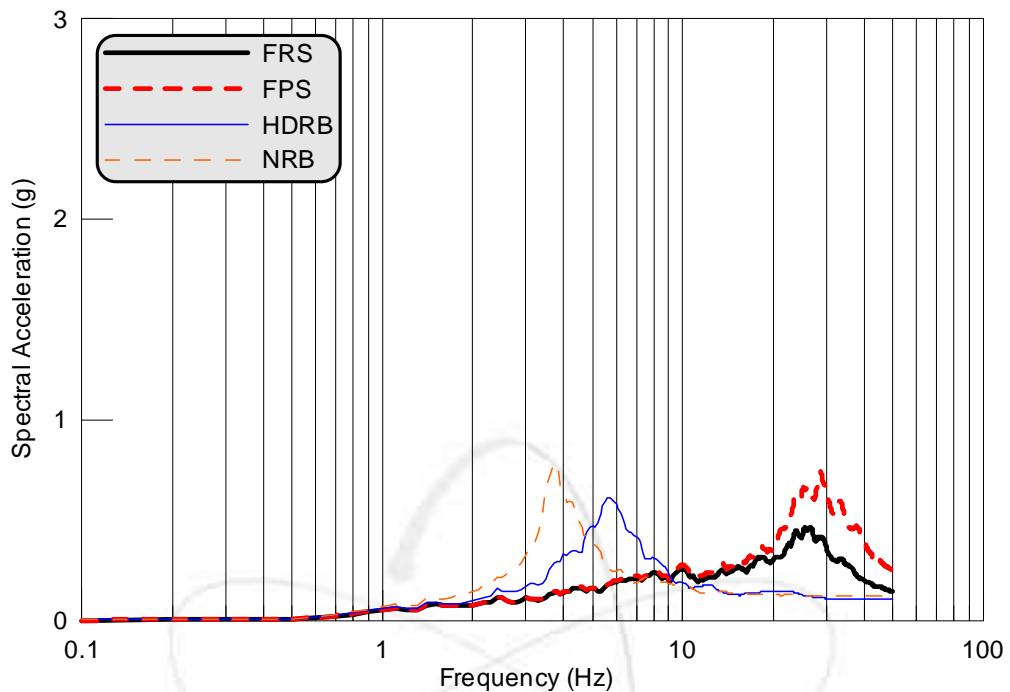
A.4 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario A.4, 1D, 0.2g)

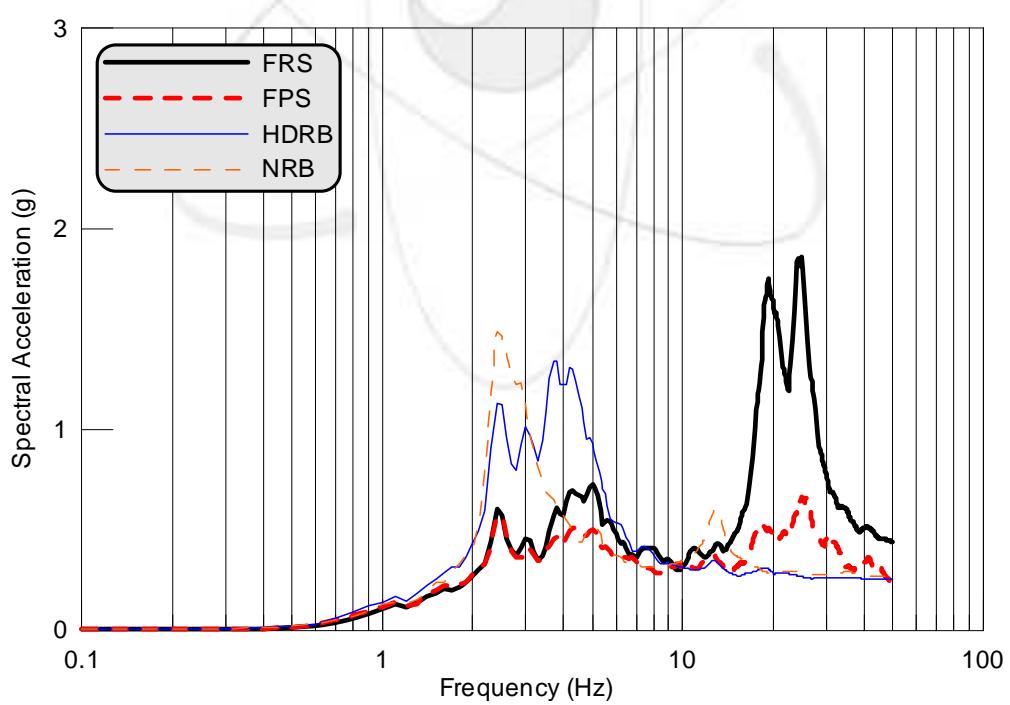
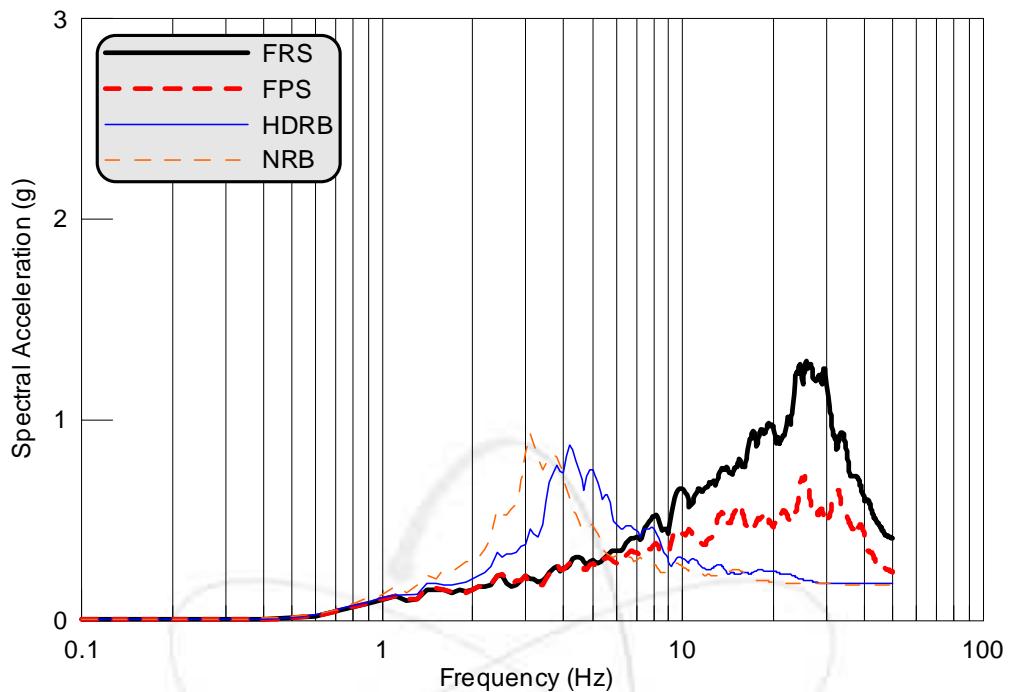


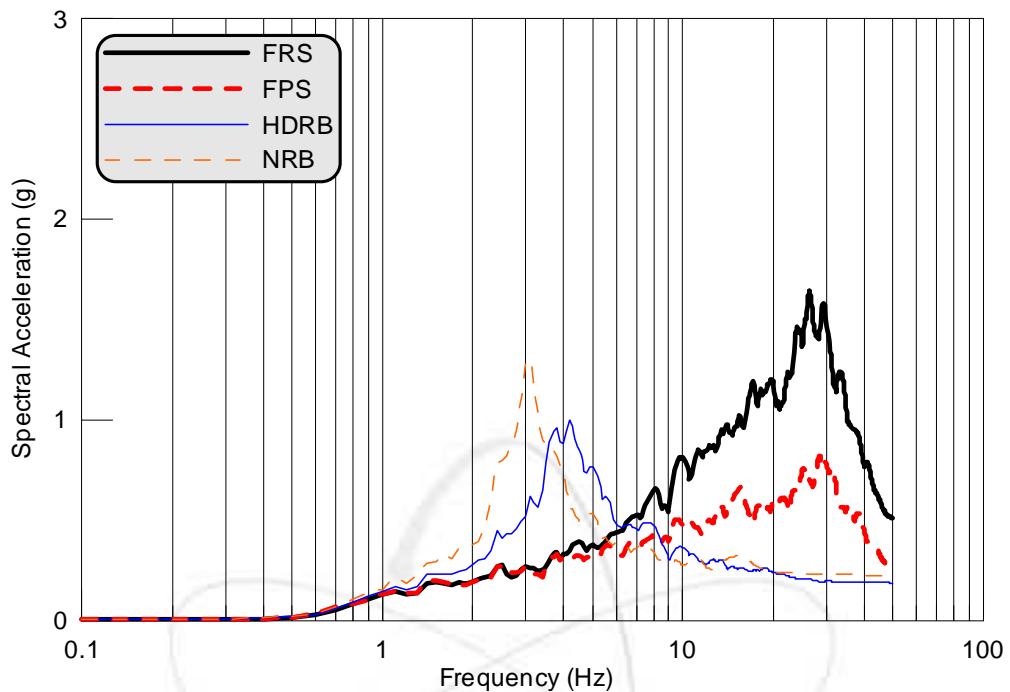
A.5 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.25g)



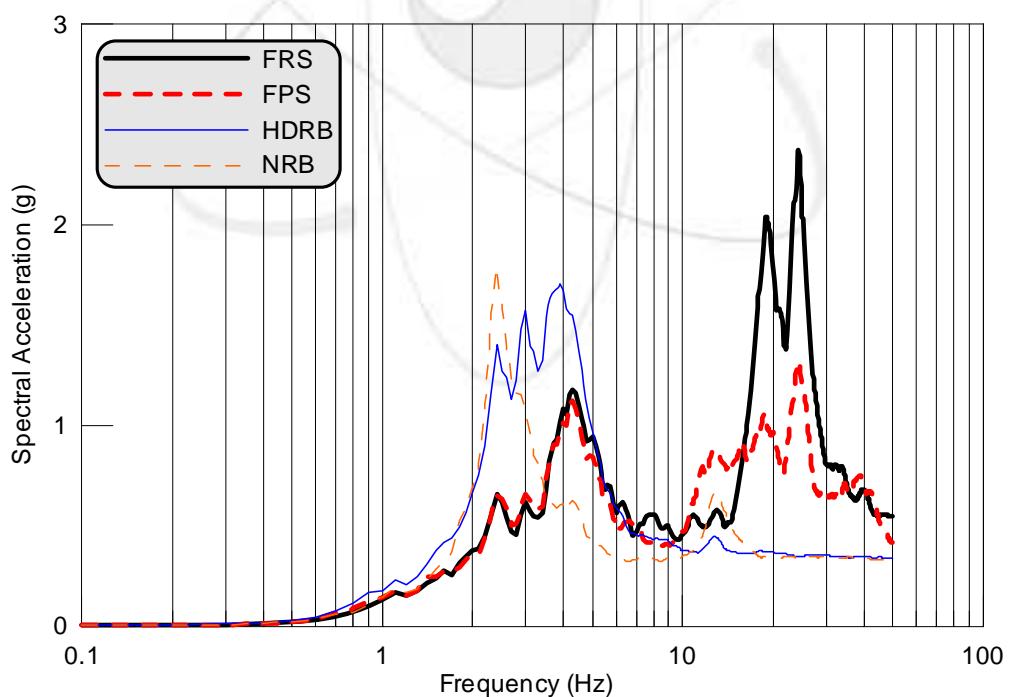
A.6 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.25g)



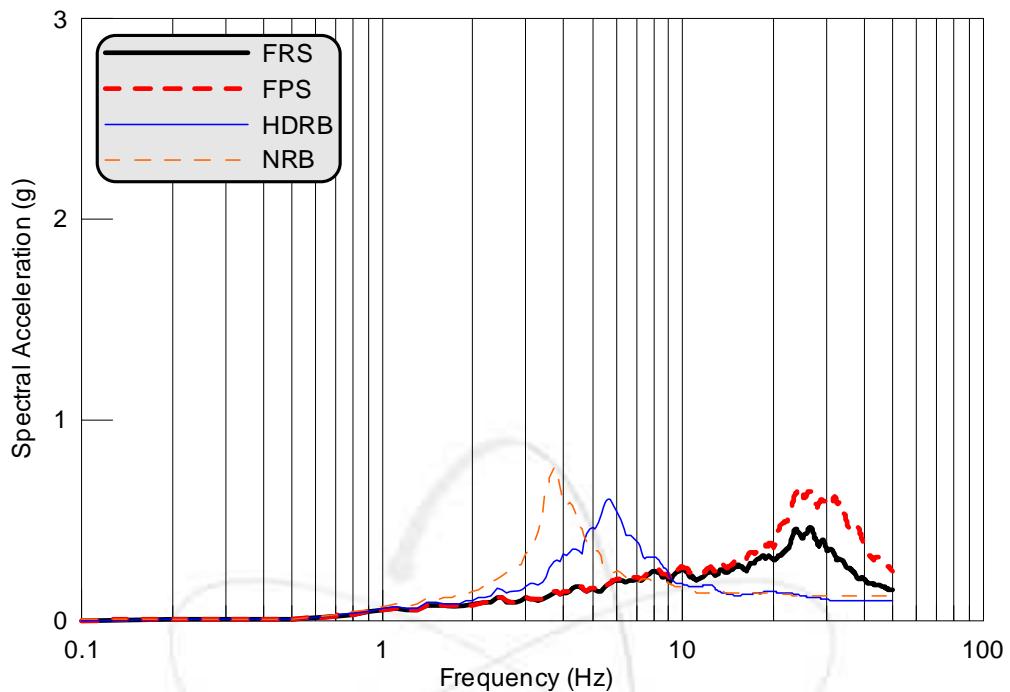




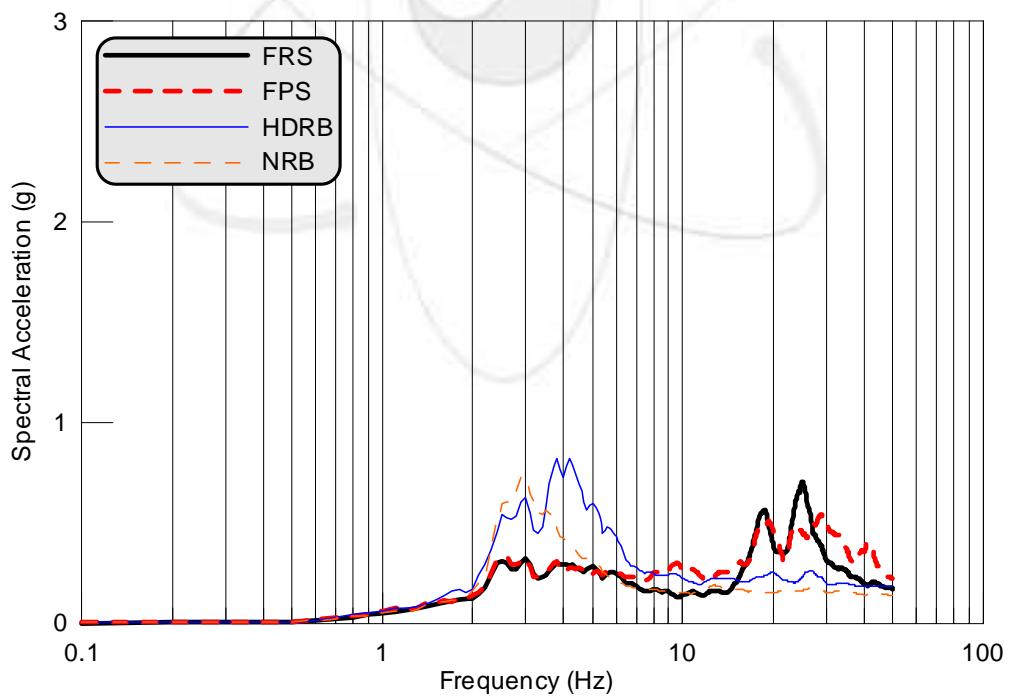
A.11 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.25g)



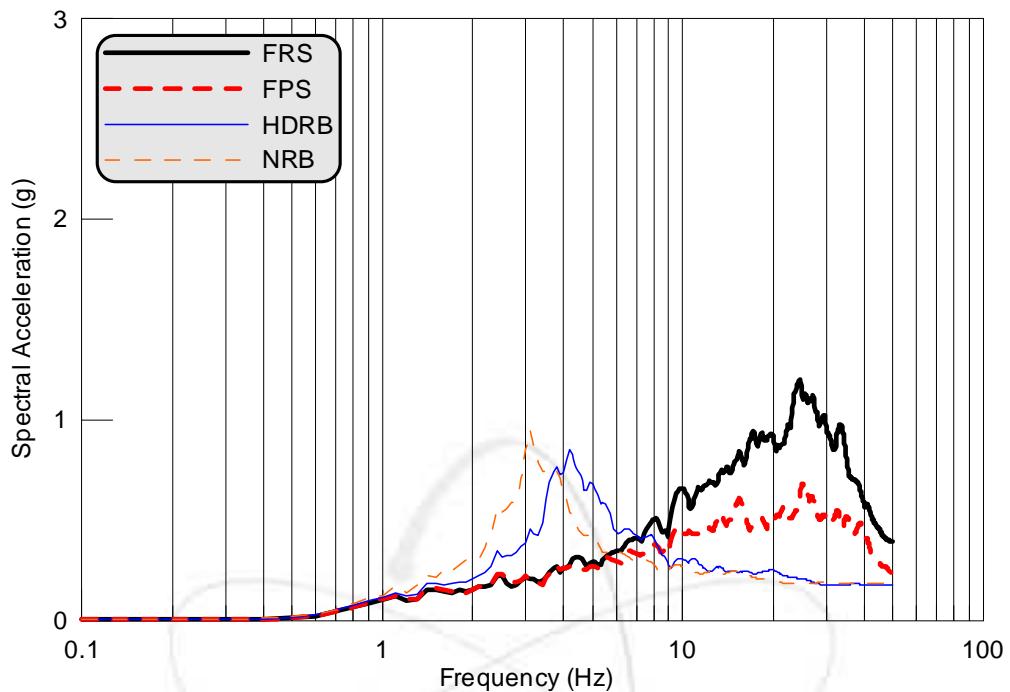
A.12 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.25g)



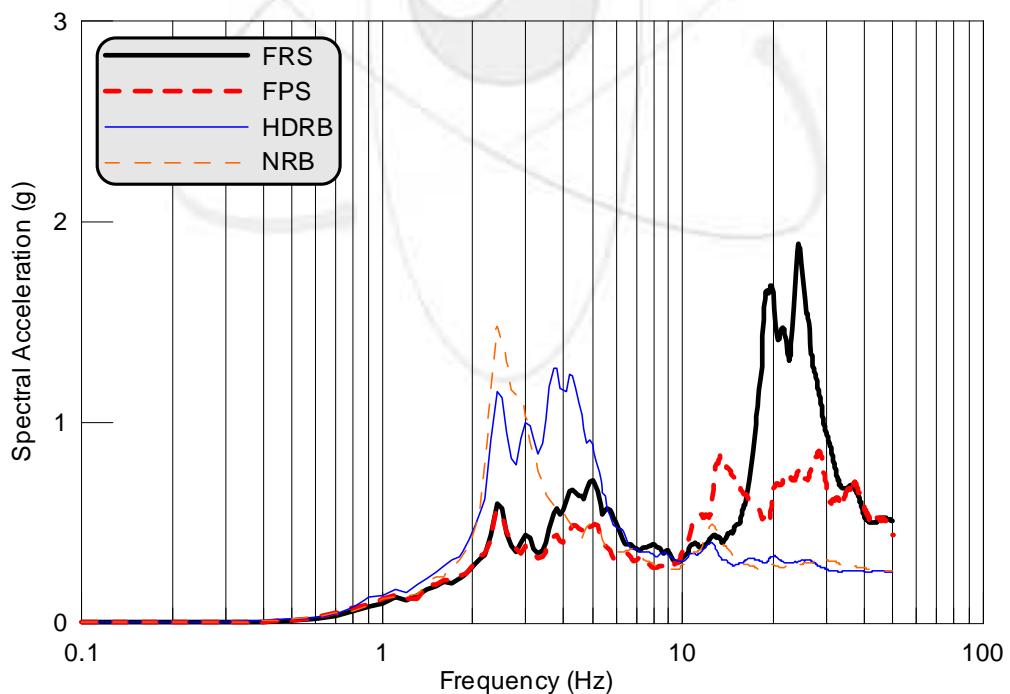
A.13 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



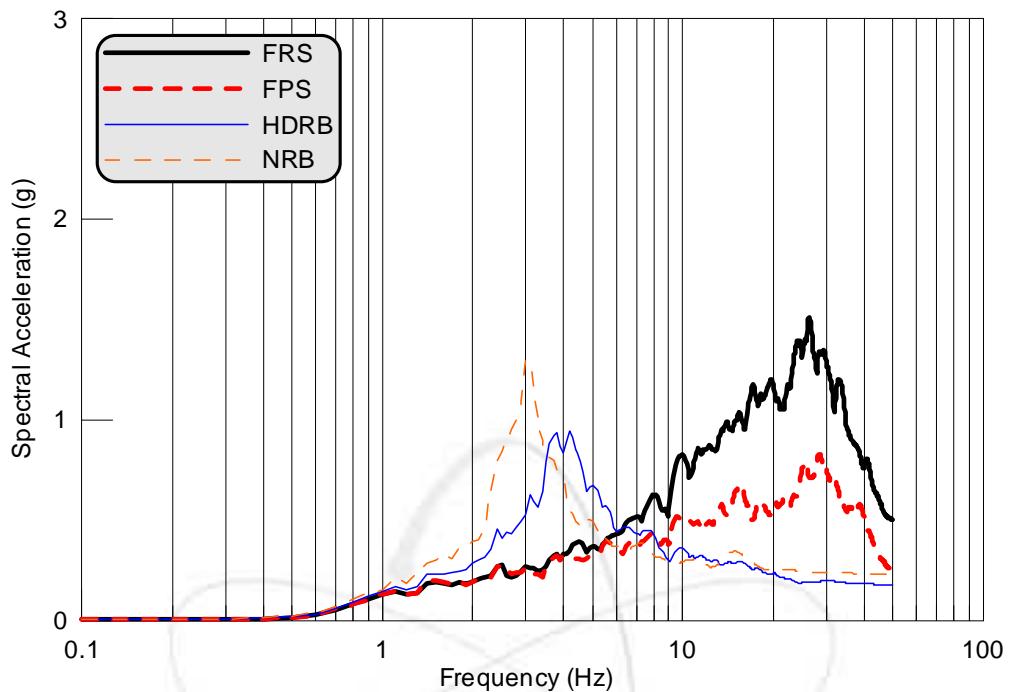
A.14 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



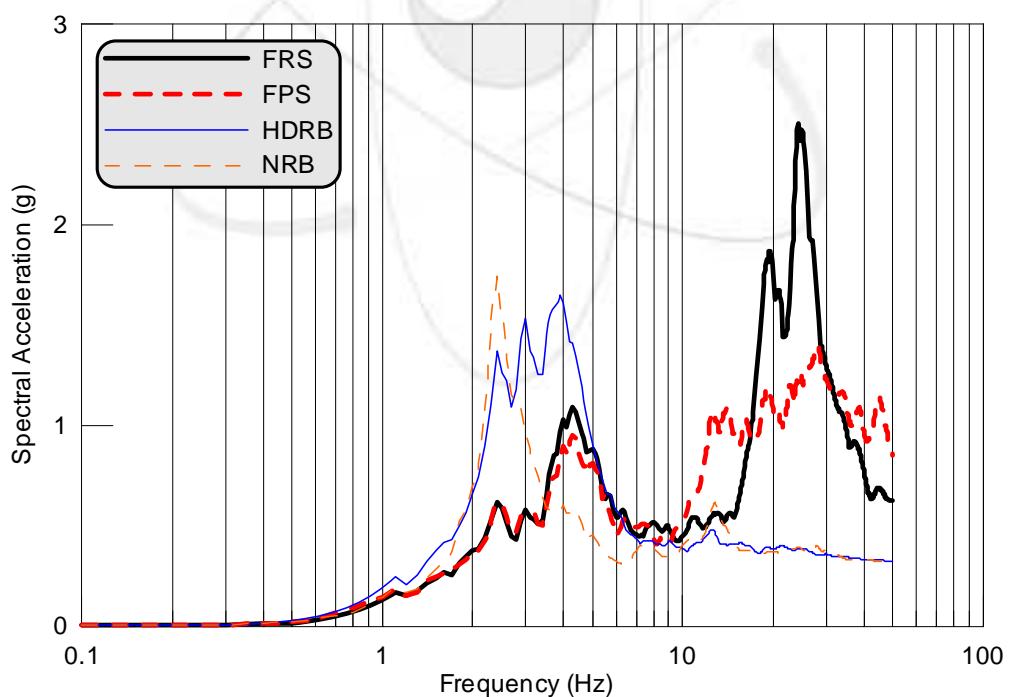
A.15 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.2g)



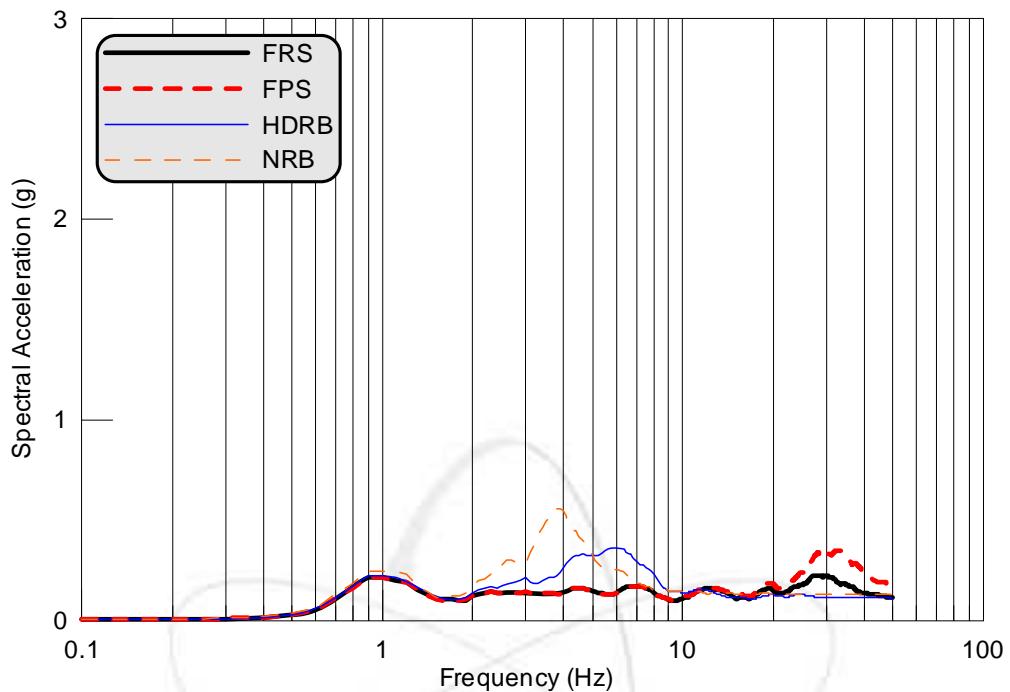
A.16 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.2g)



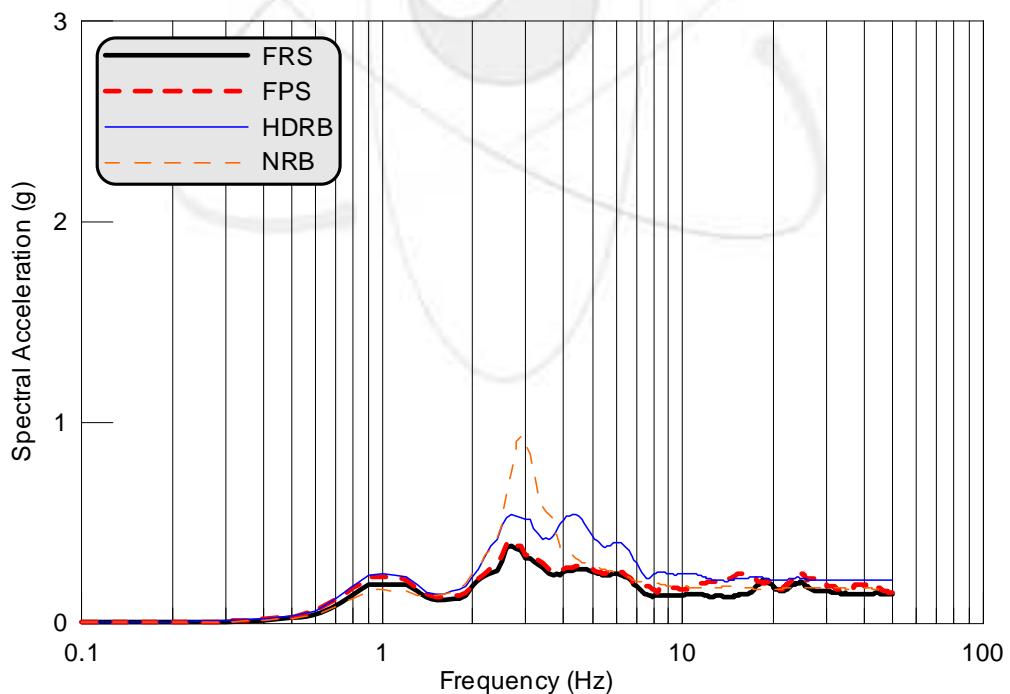
A.17 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.25g)



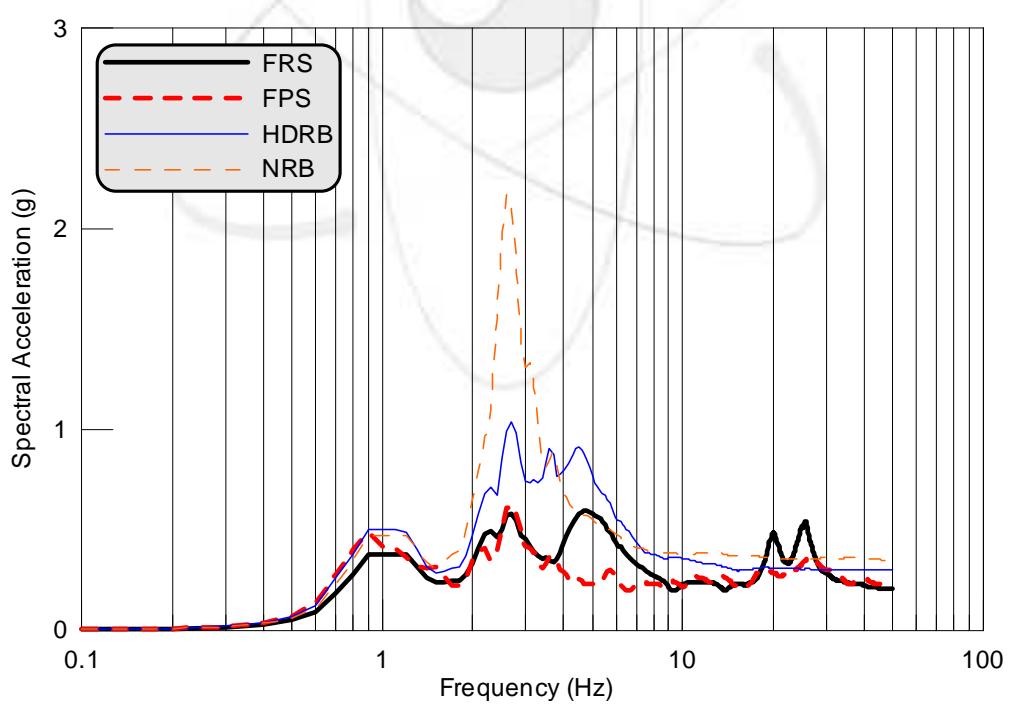
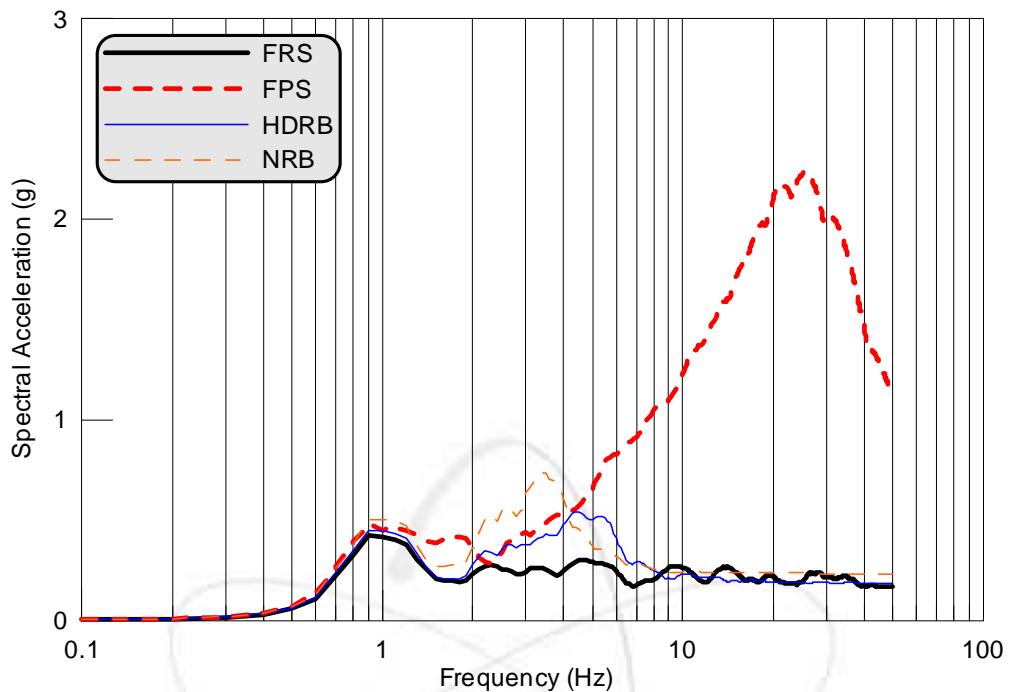
A.18 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.25g)

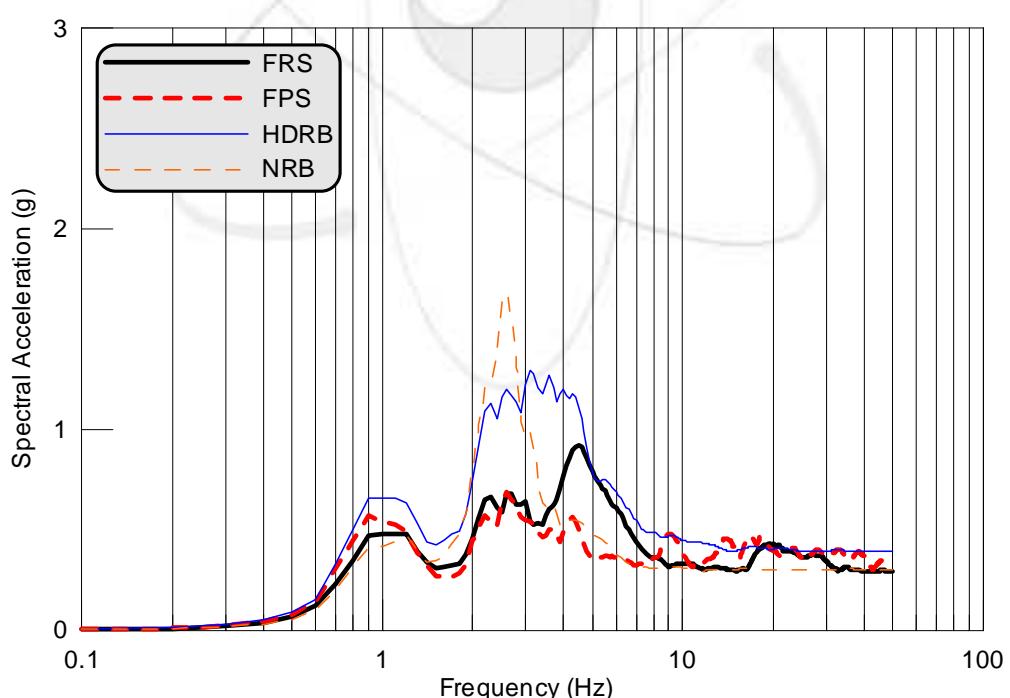
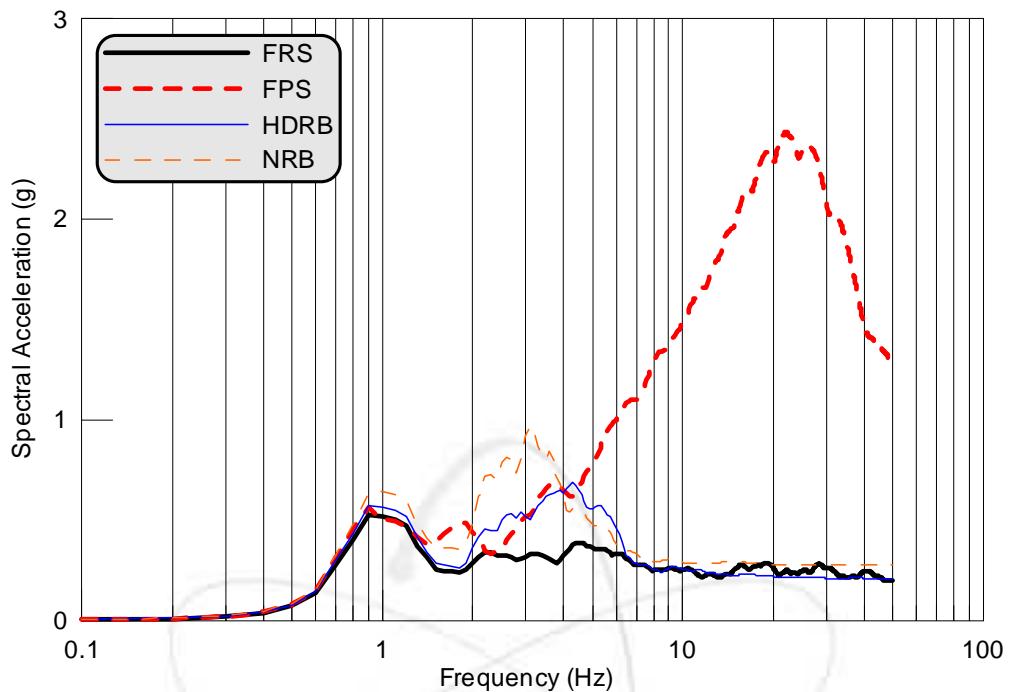


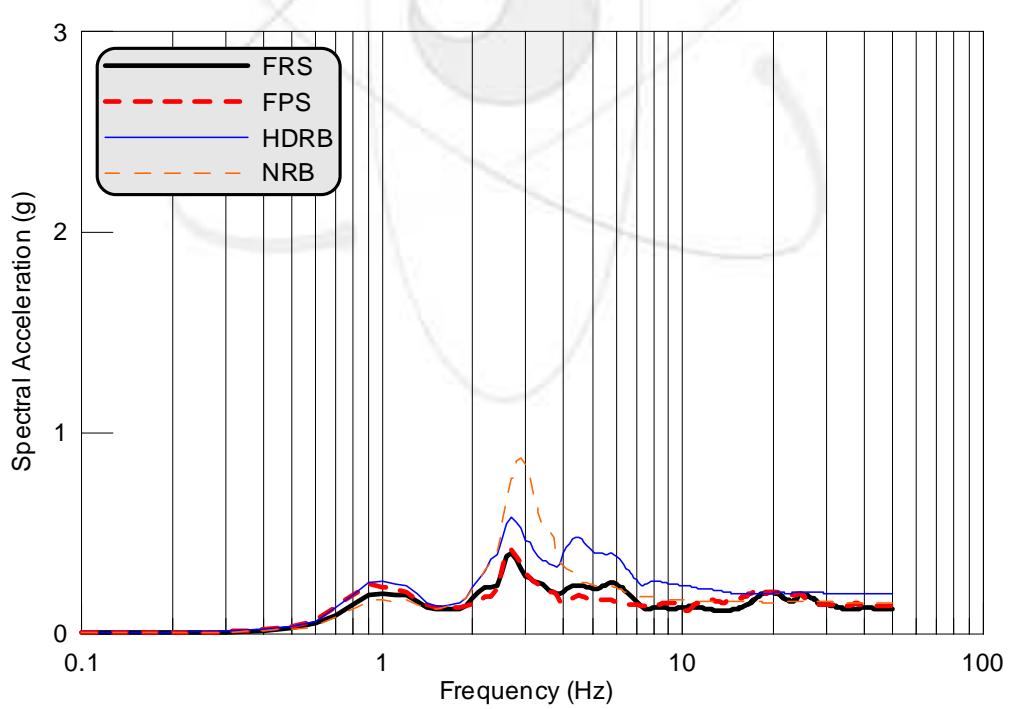
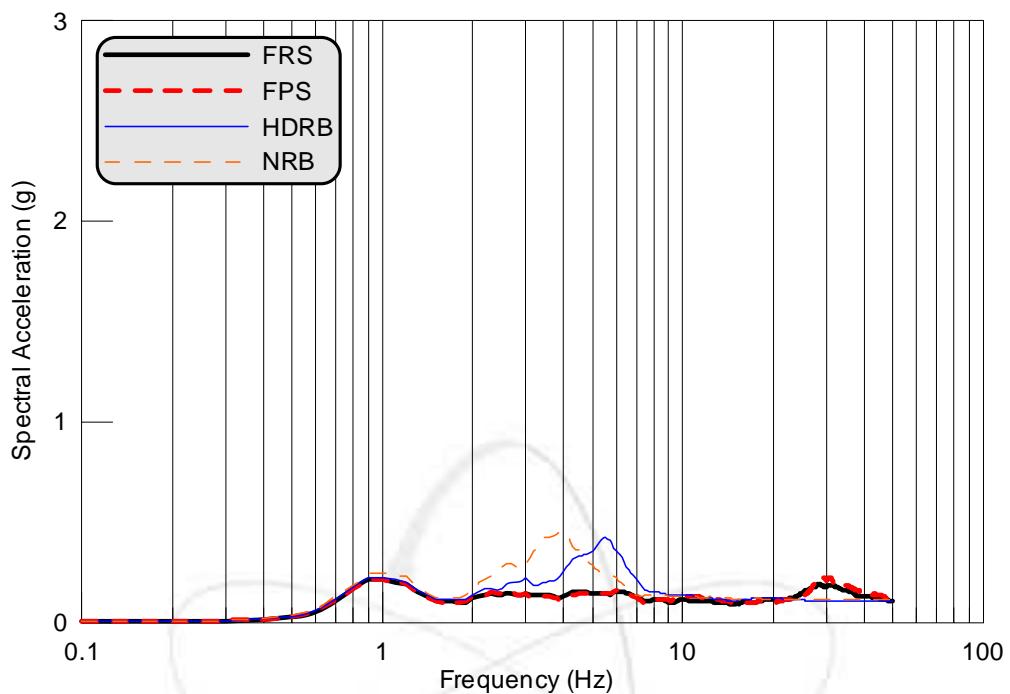
A.19 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)

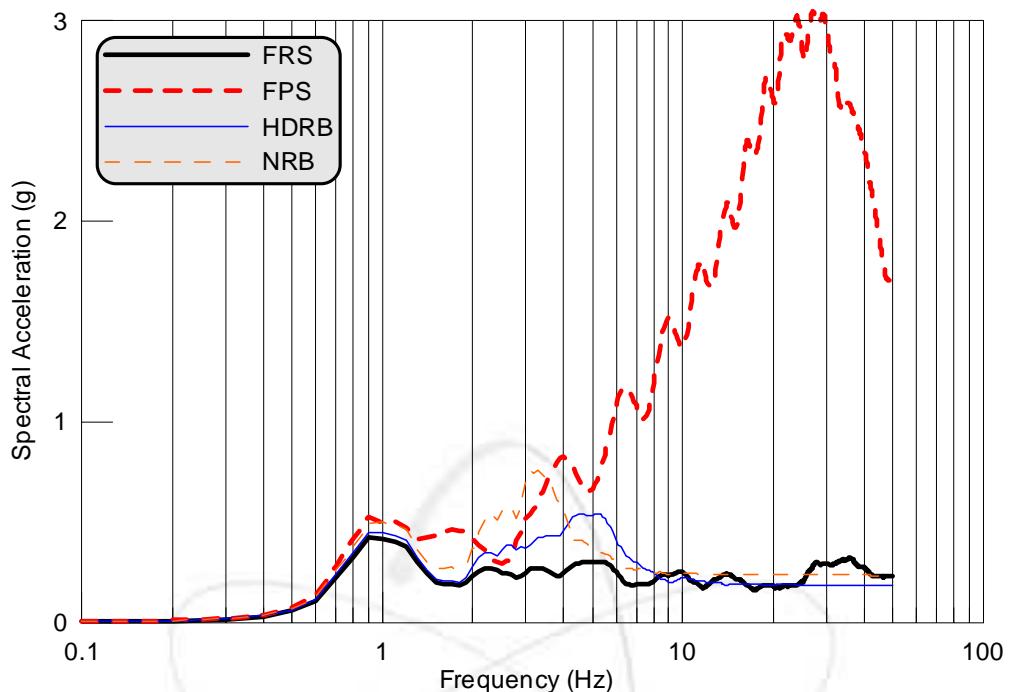


A.20 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)

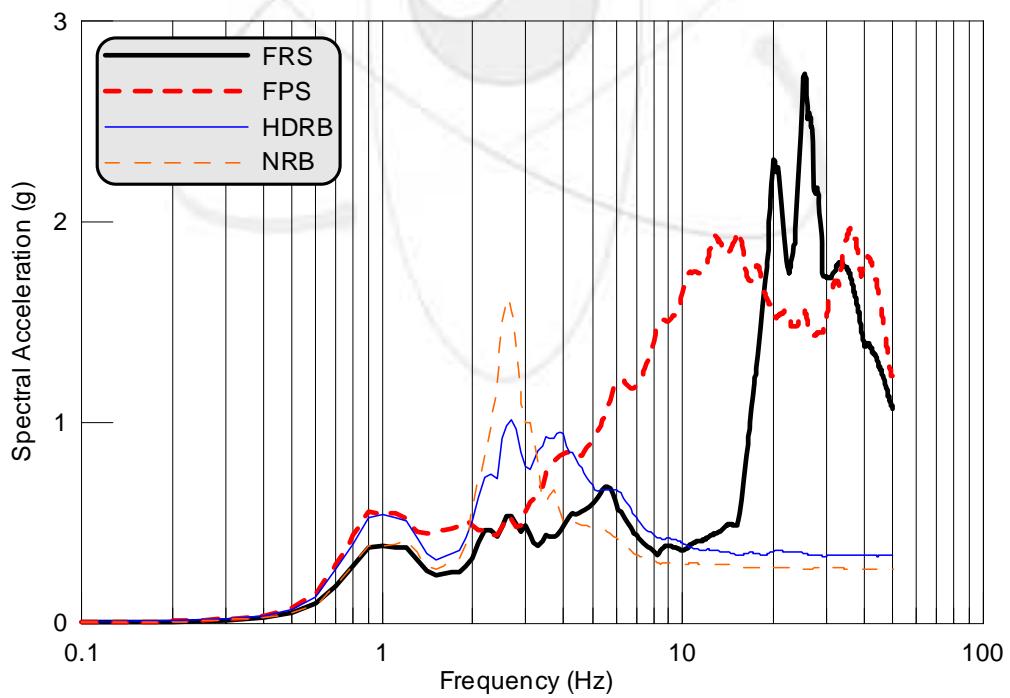




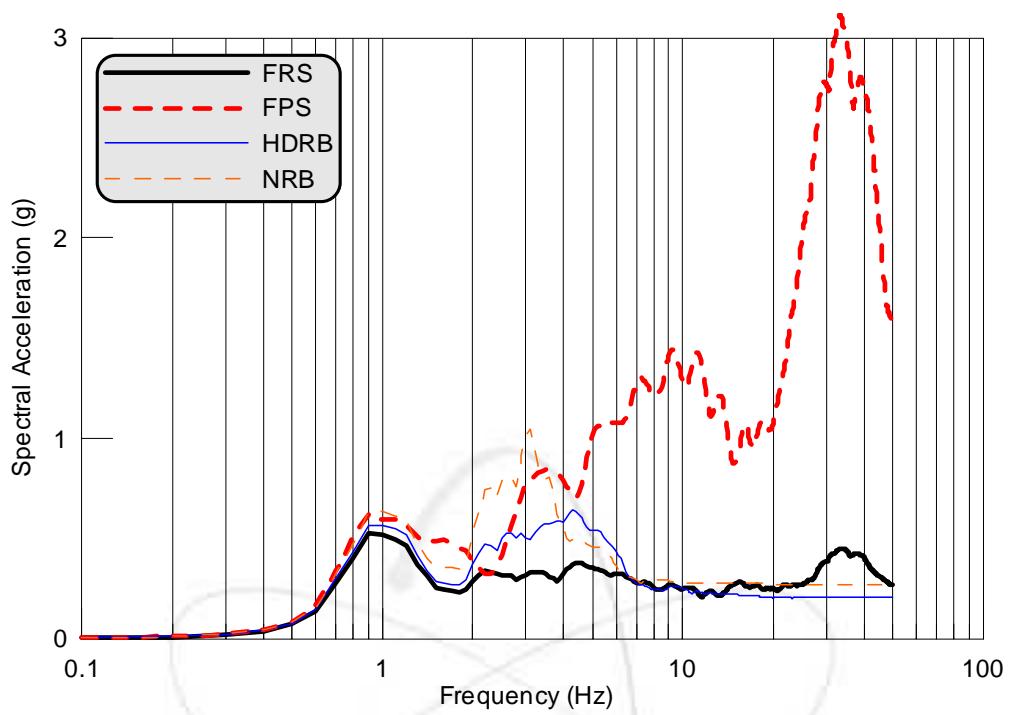




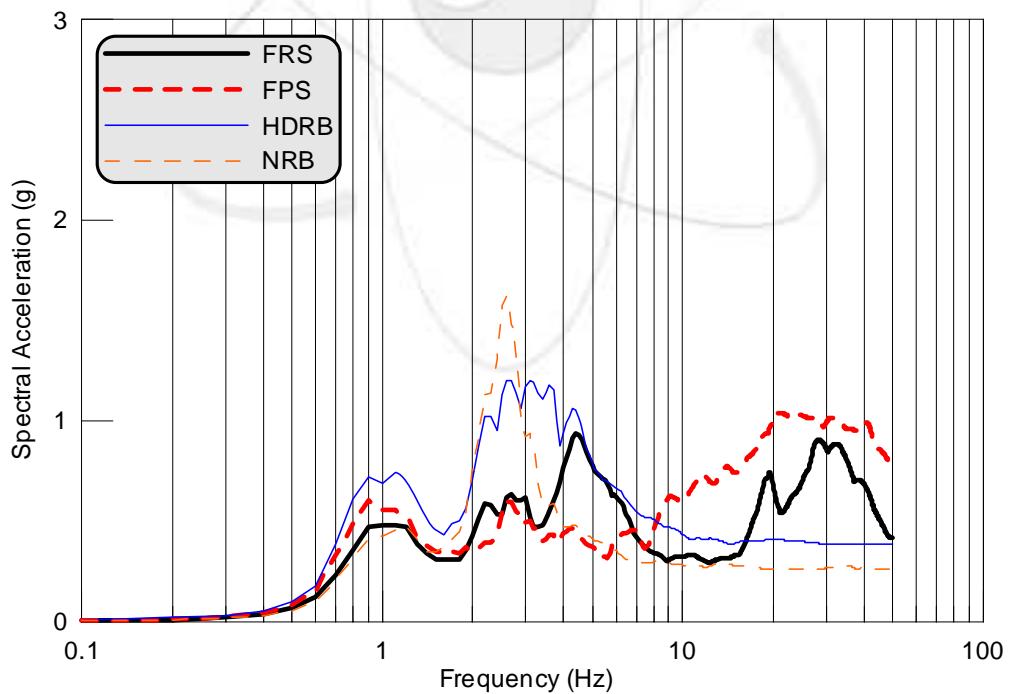
A.27 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.2g)



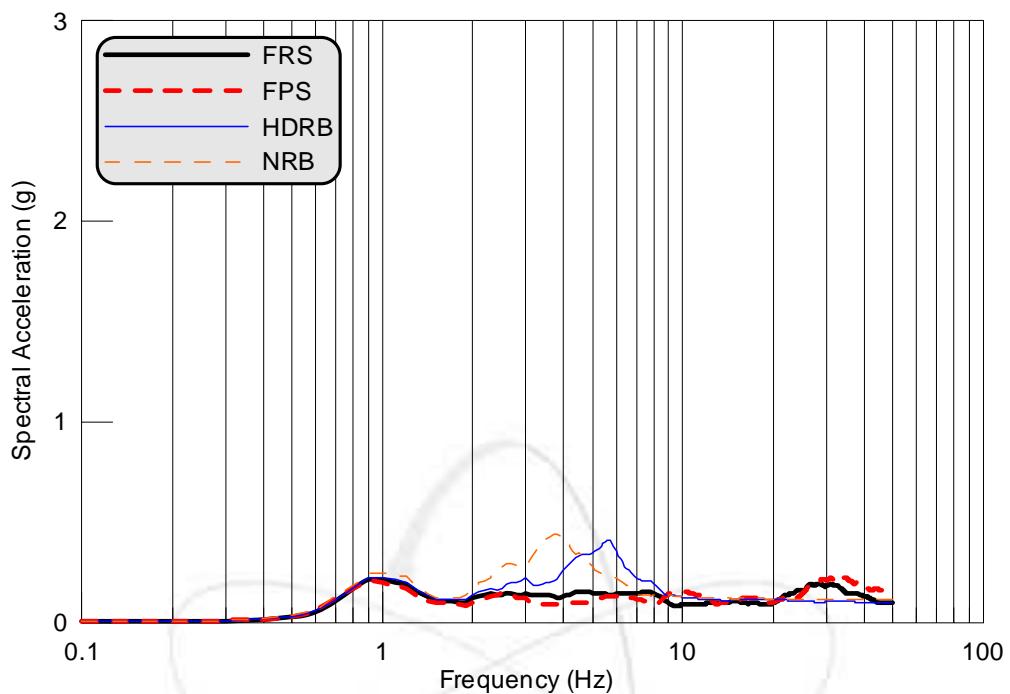
A.28 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.2g)



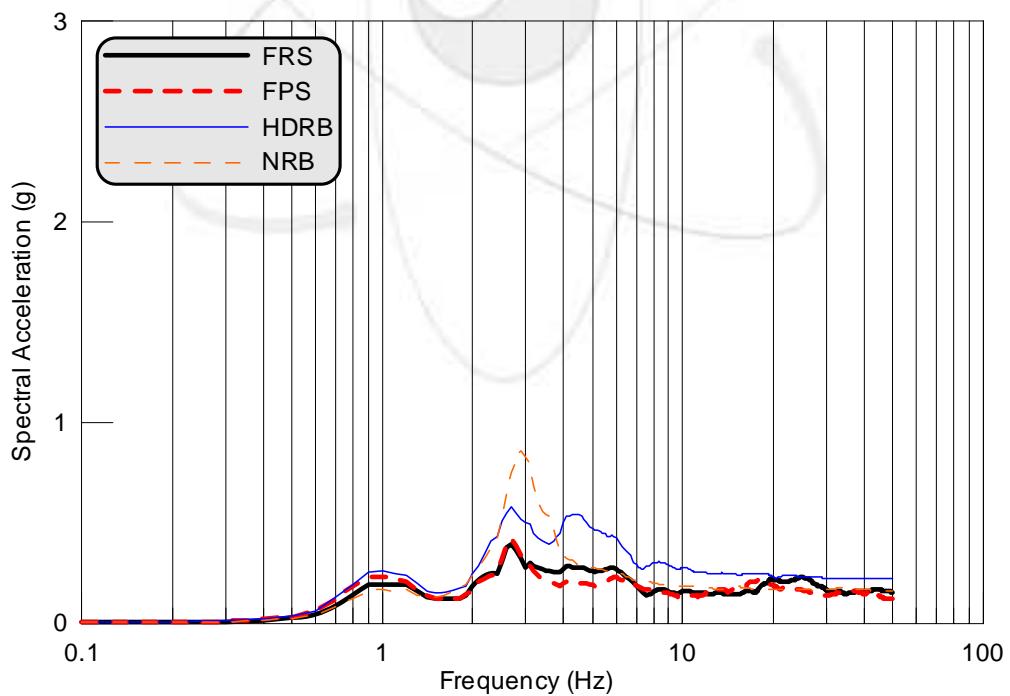
A.29 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.25g)



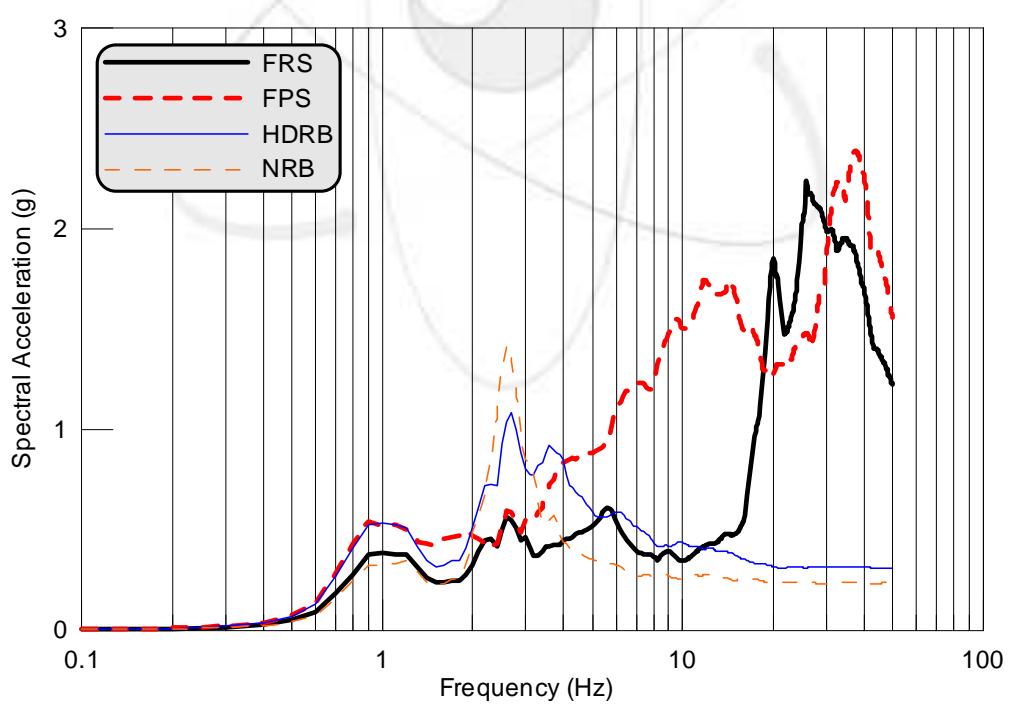
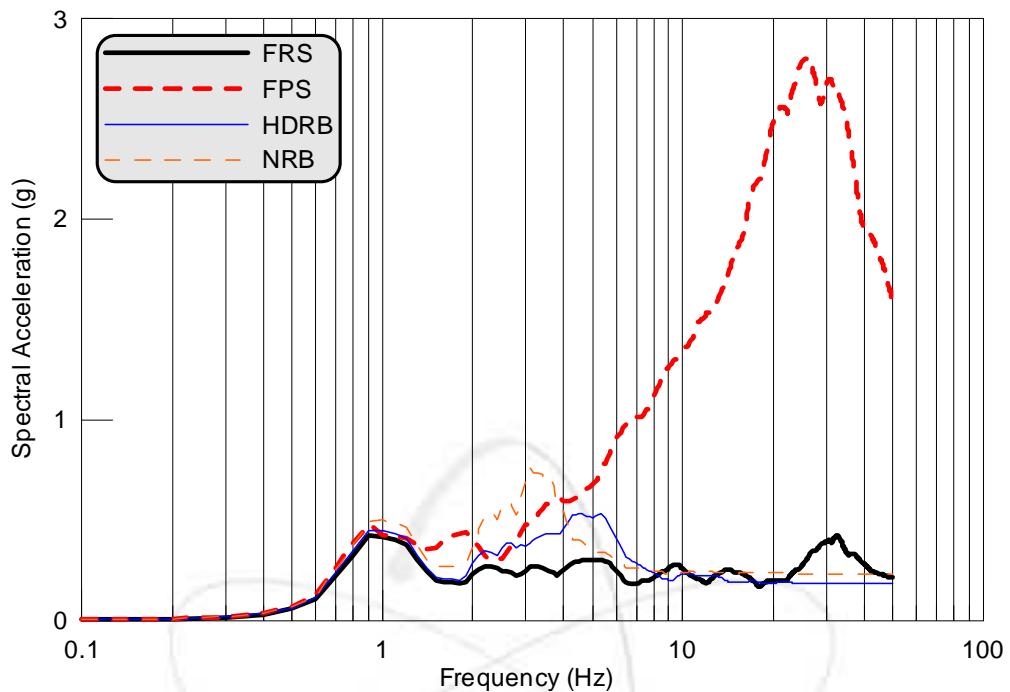
A.30 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.25g)

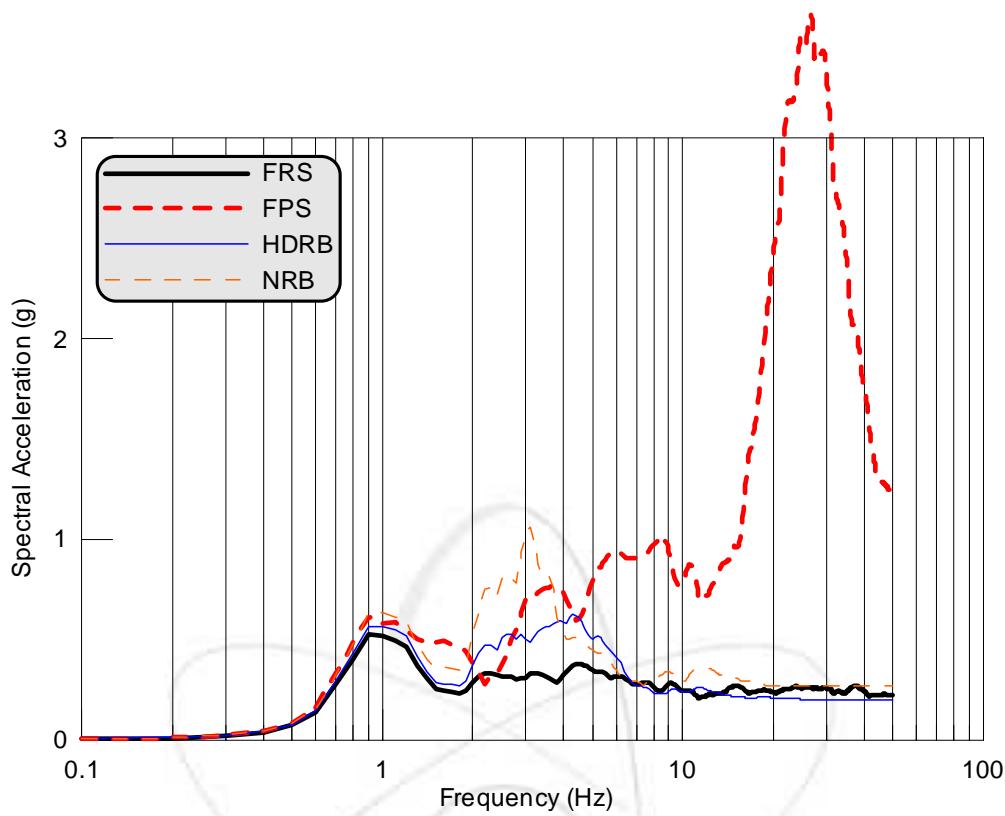


A.31 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)

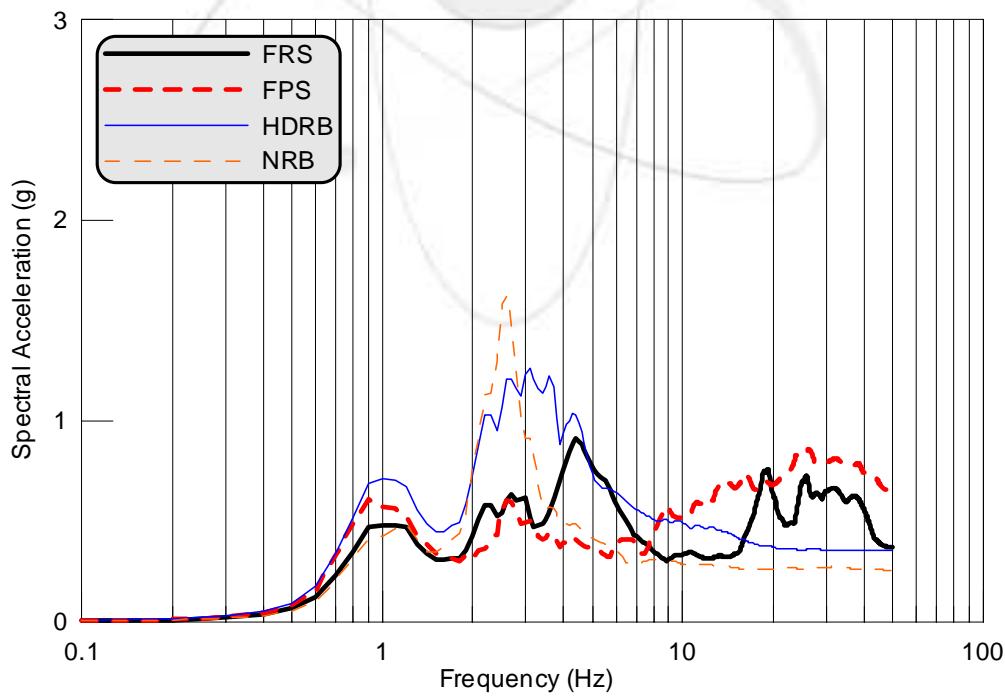


A.32 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)

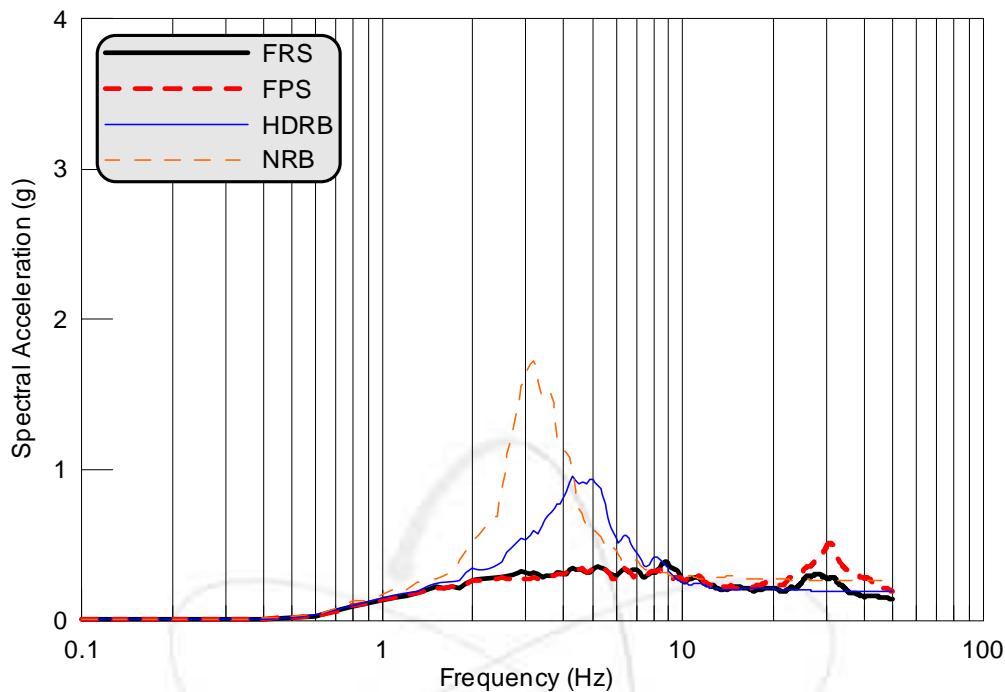




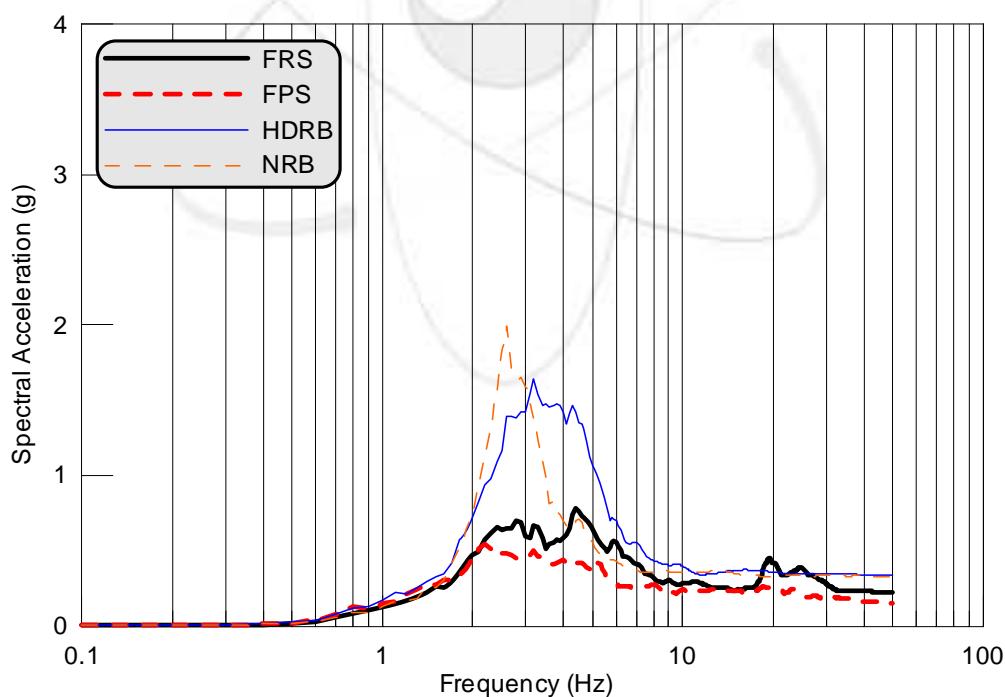
A.35 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.25g)



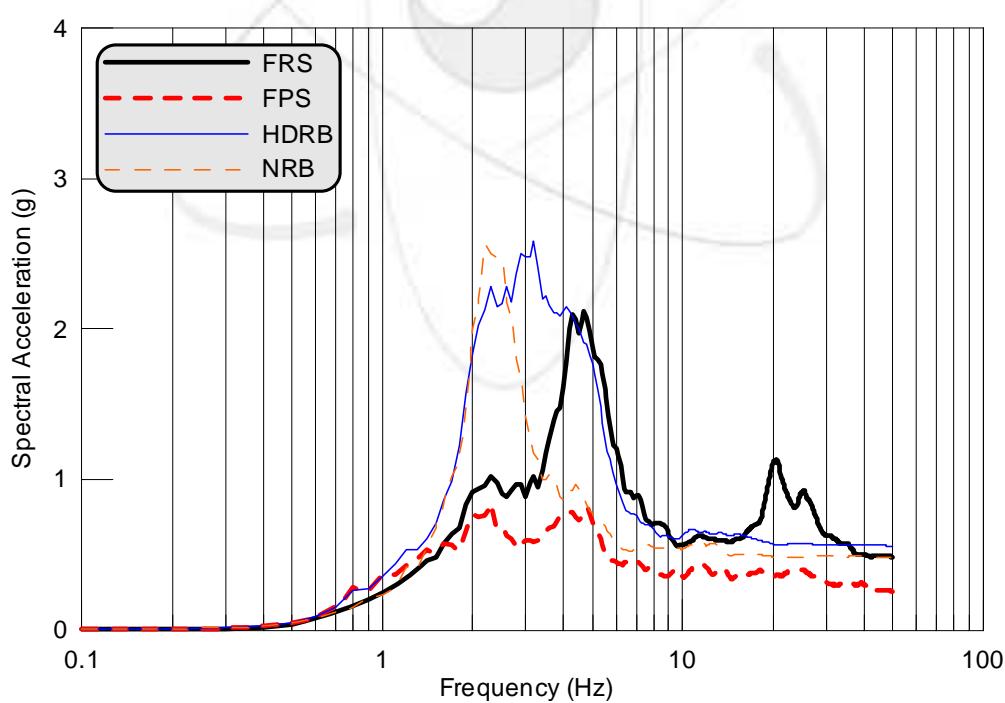
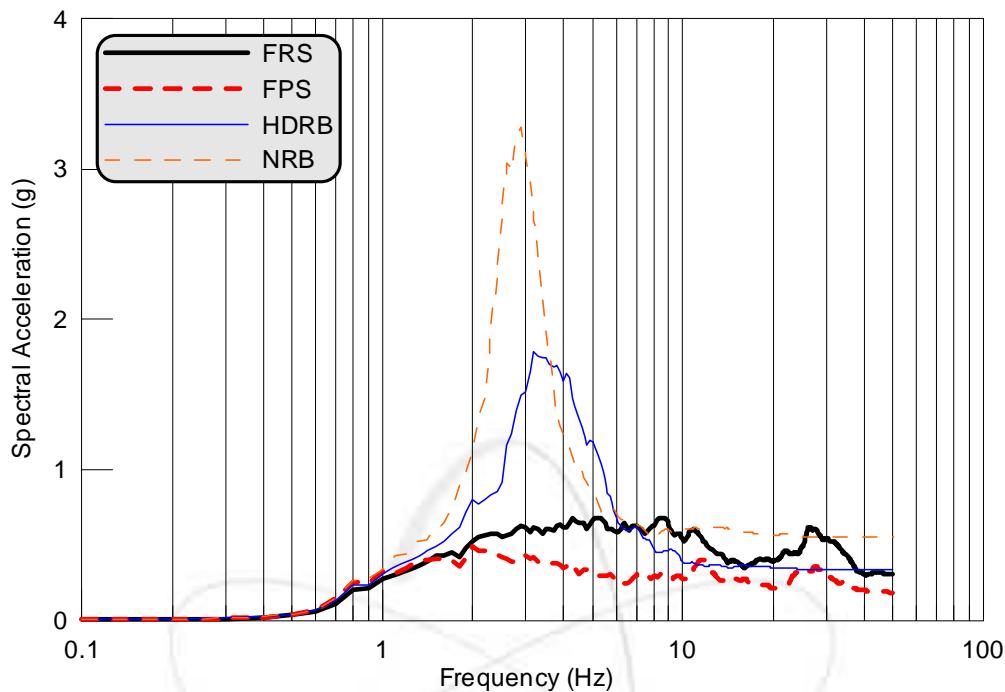
A.36 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.25g)

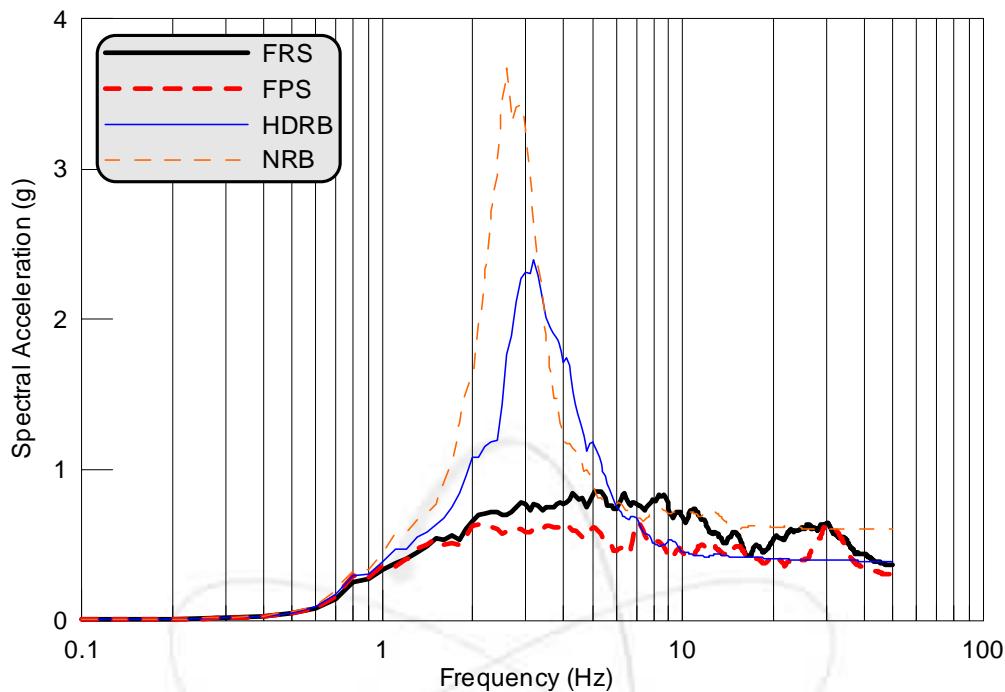


A.37 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)

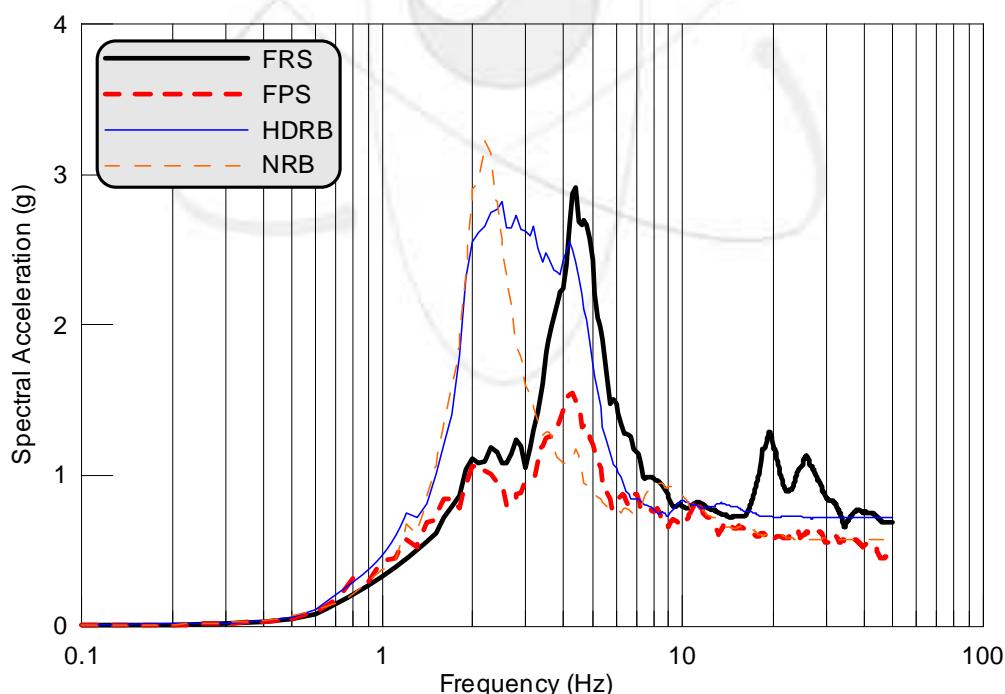


A.38 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)

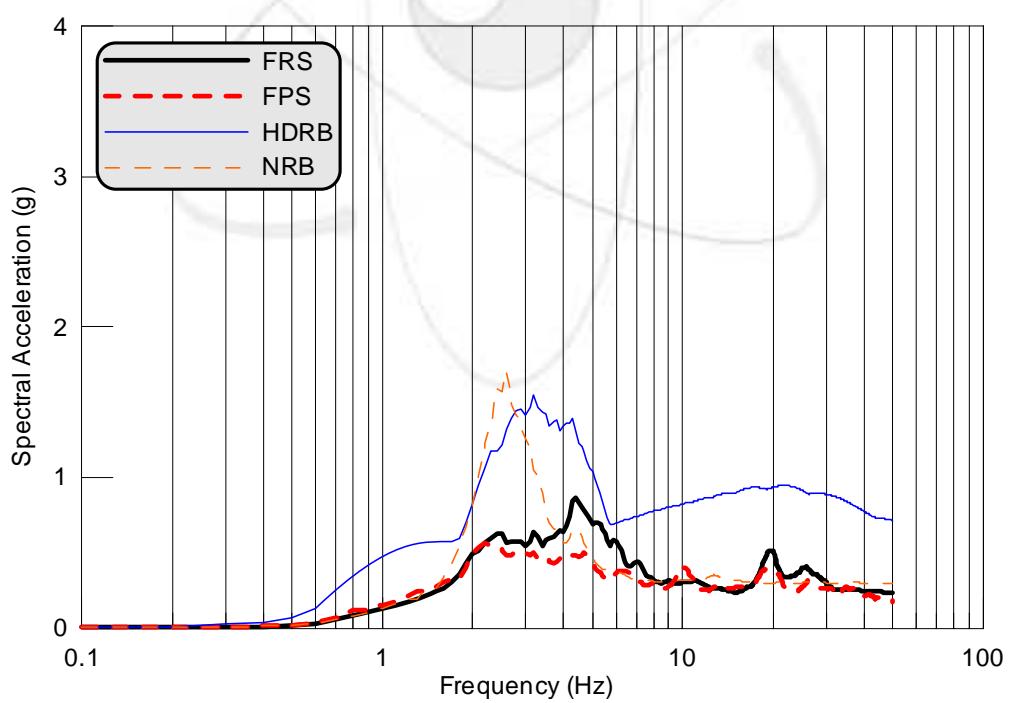
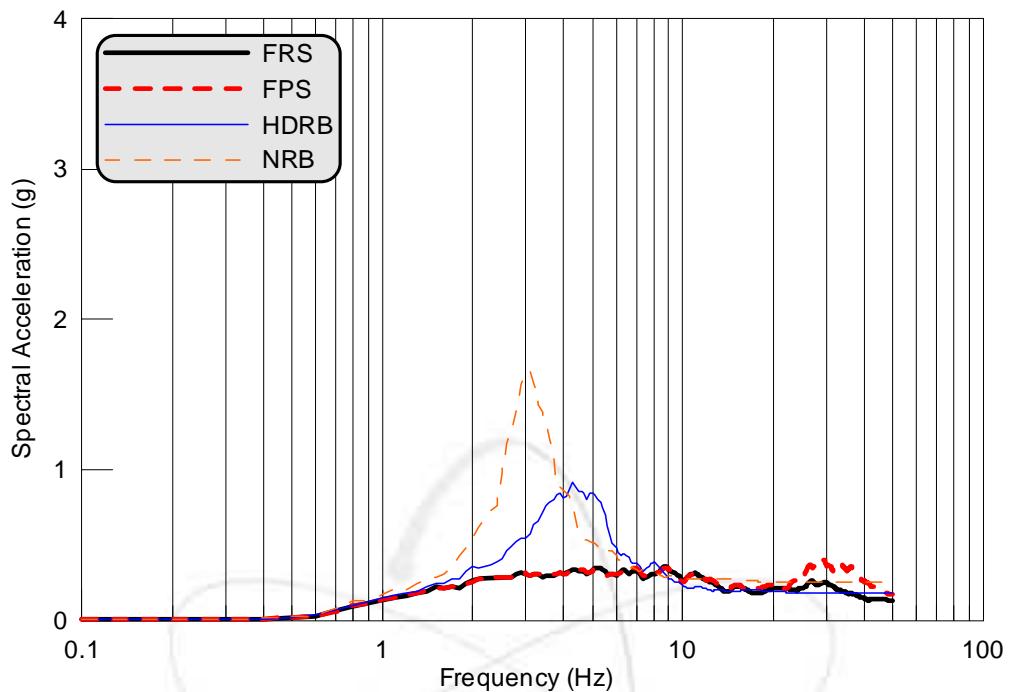


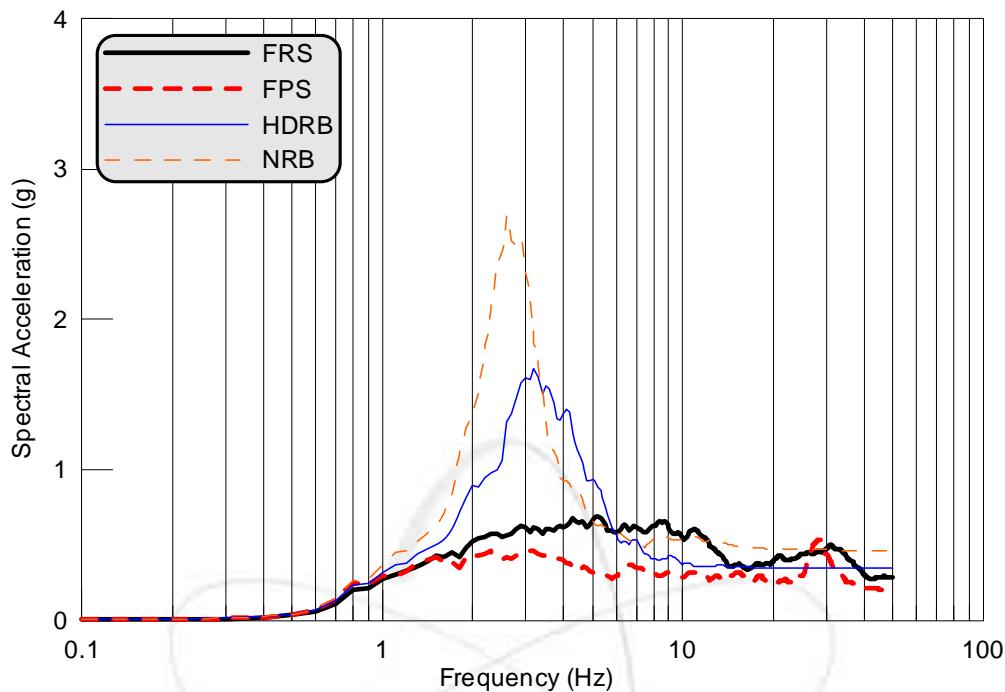


A.41 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.25g)

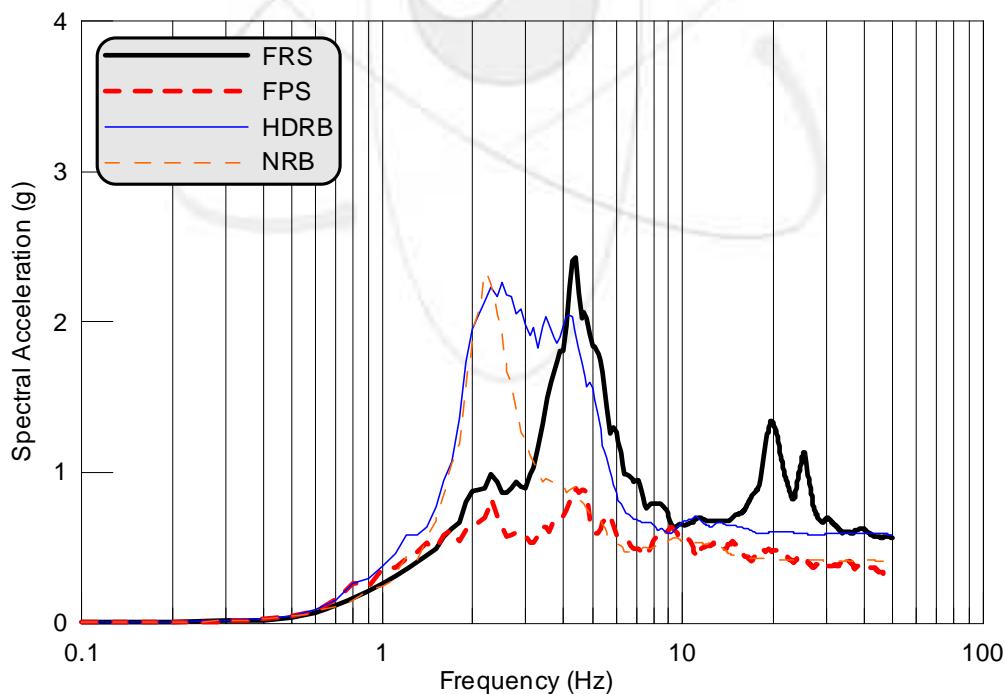


A.42 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.25g)

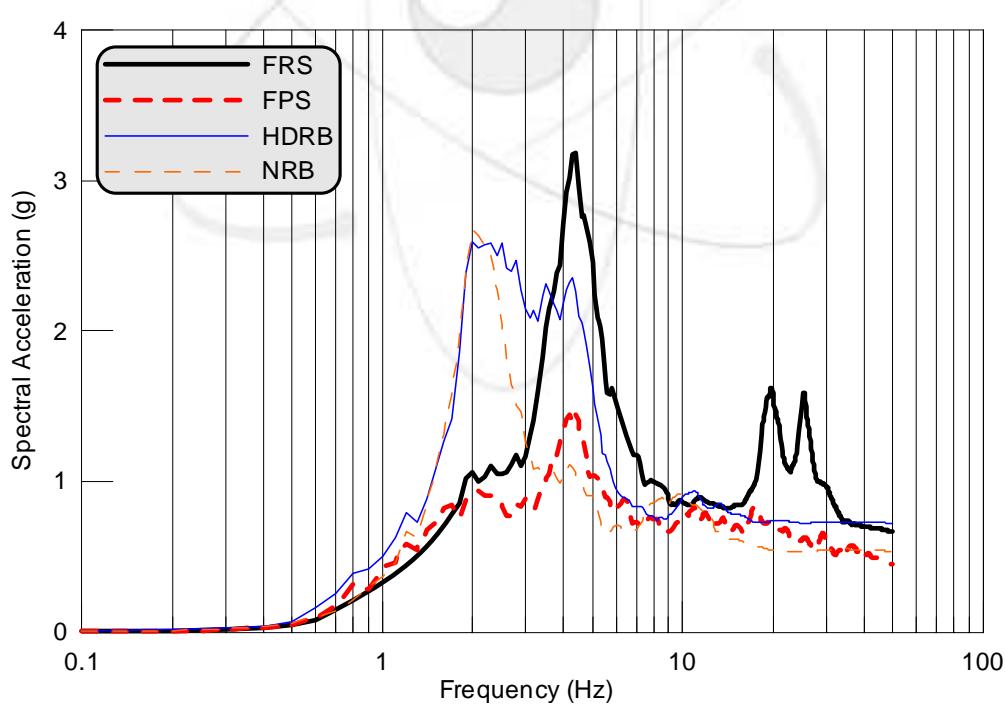
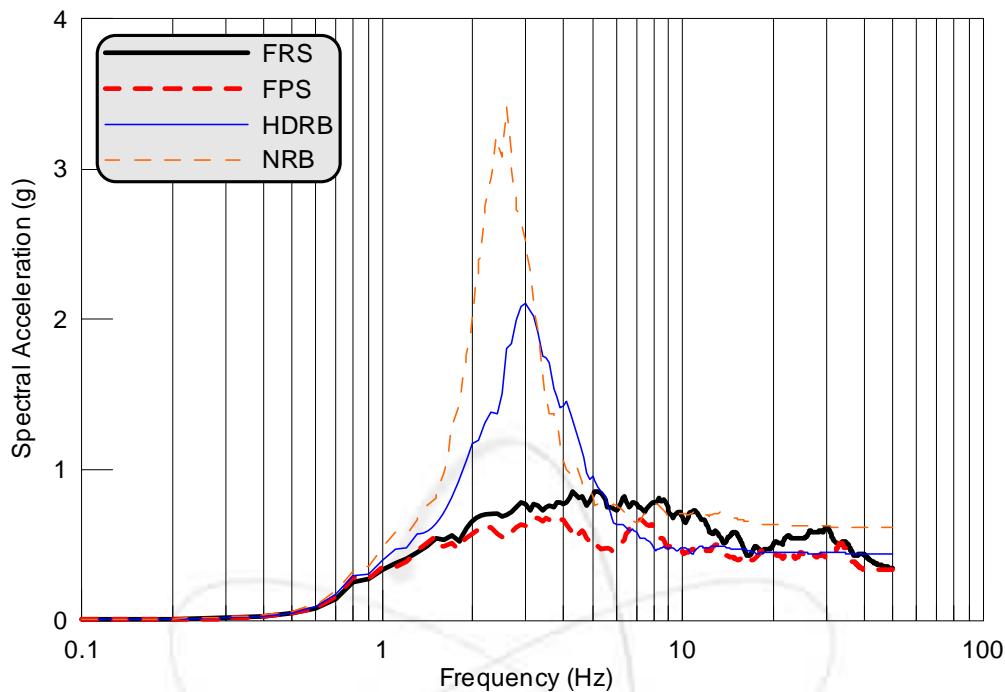


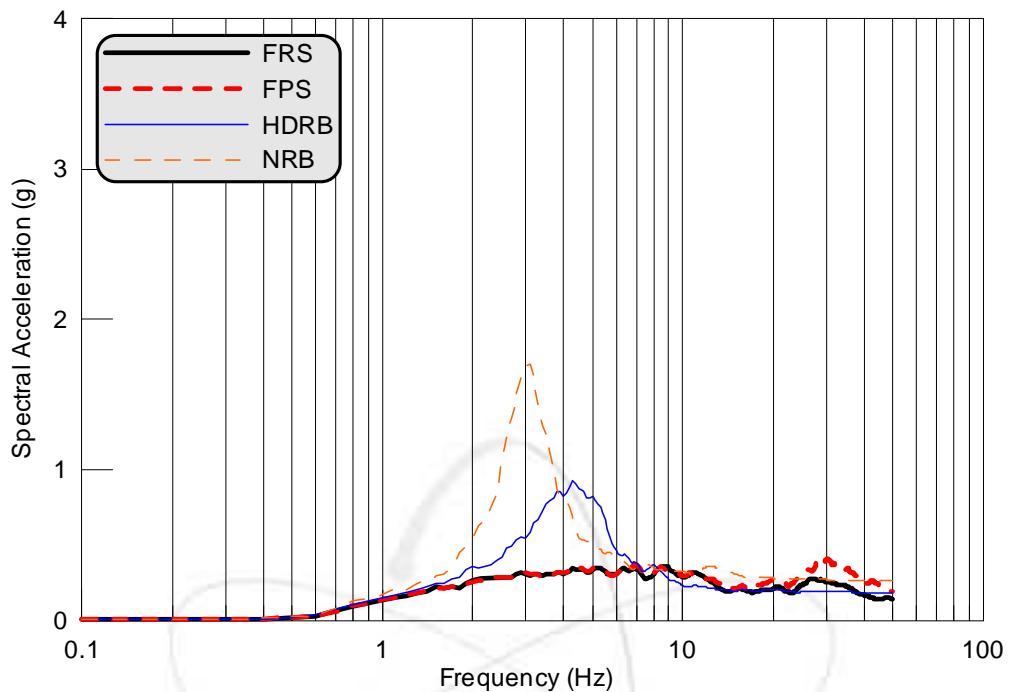


A.45 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.2g)

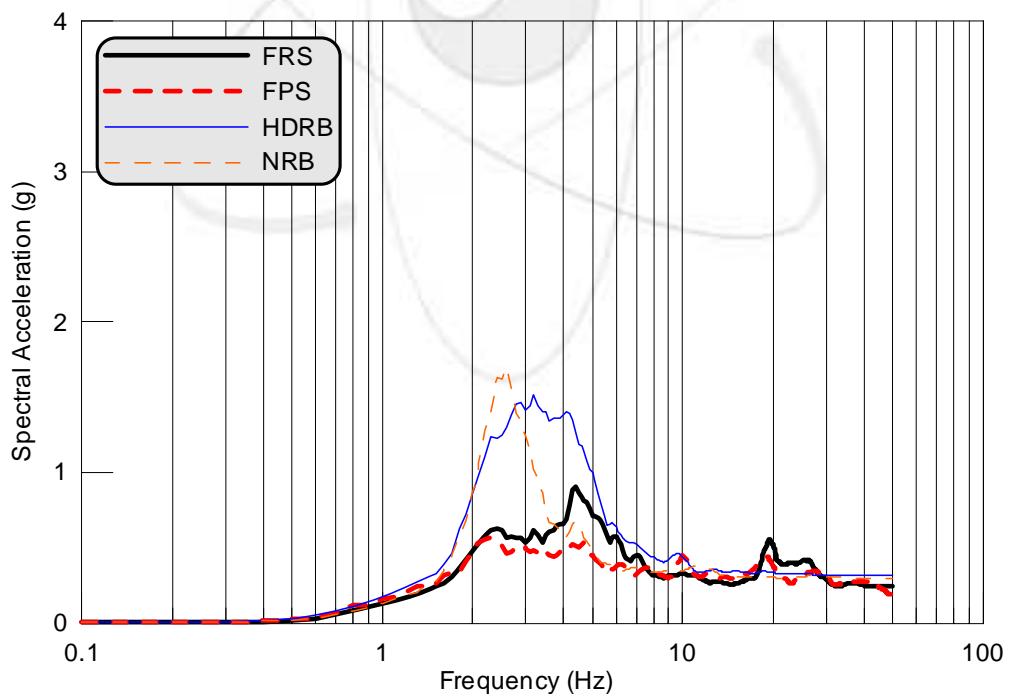


A.46 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.2g)

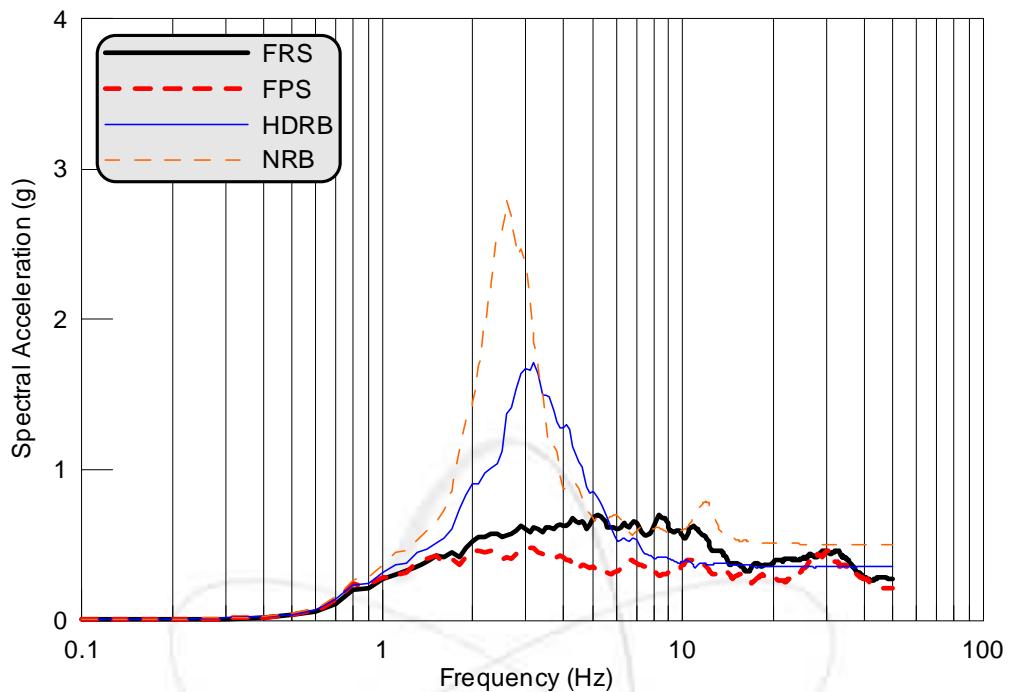




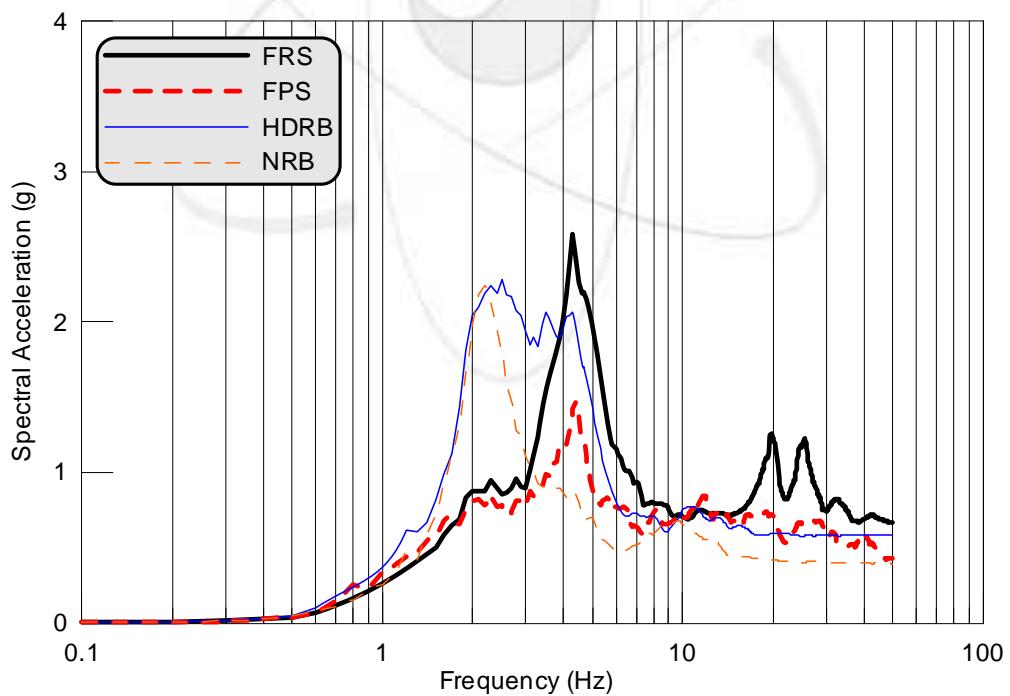
A.49 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)



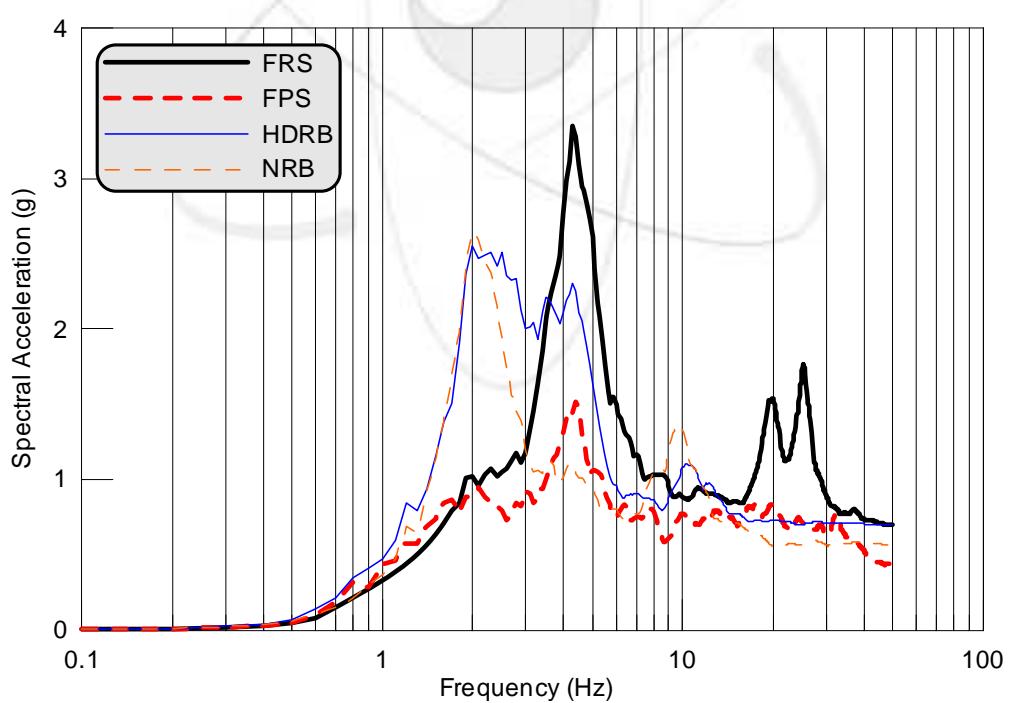
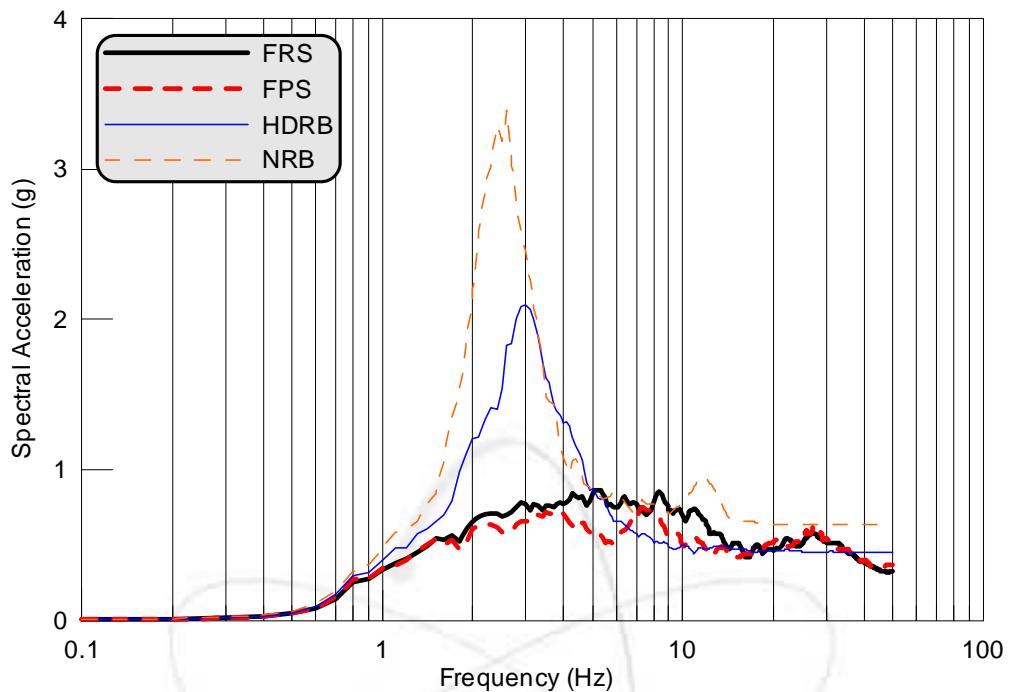
A.50 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)

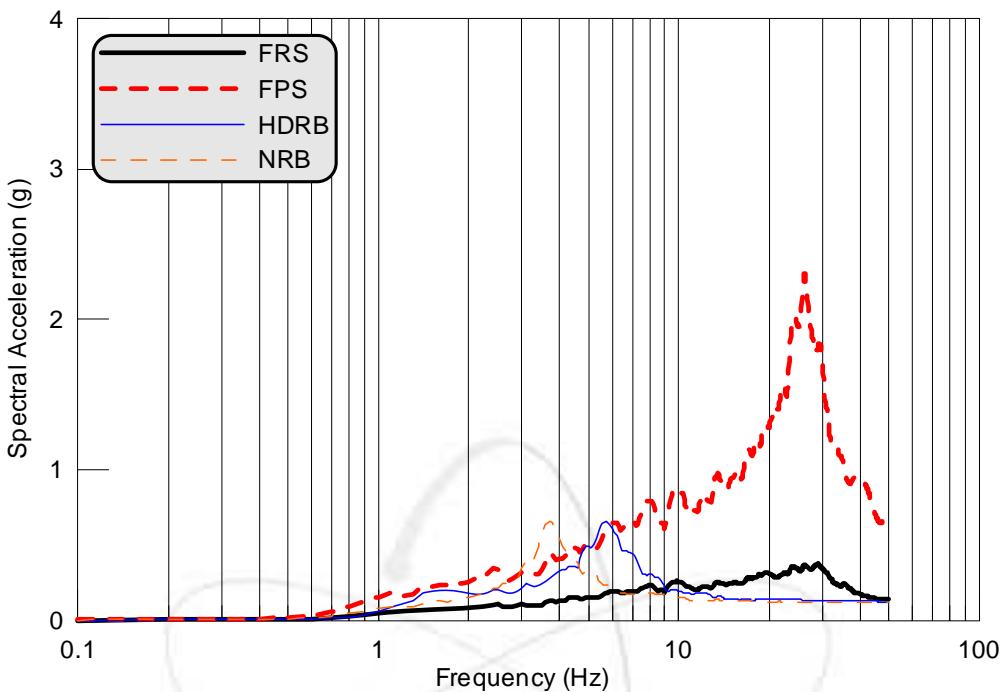


A.51 4층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.2g)

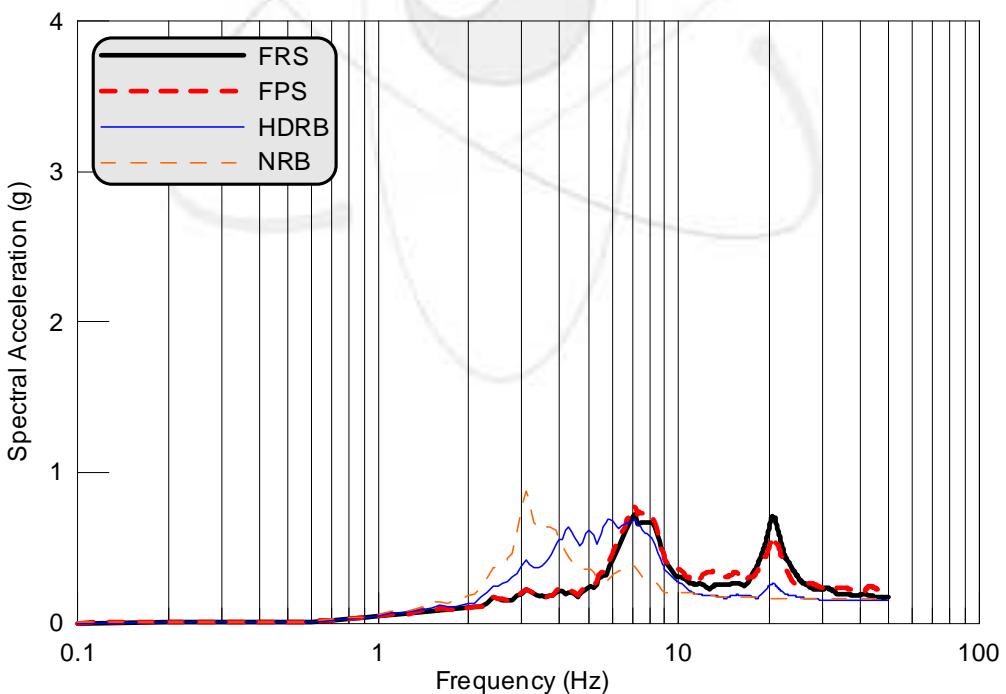


A.52 4층 구조물 4층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.2g)

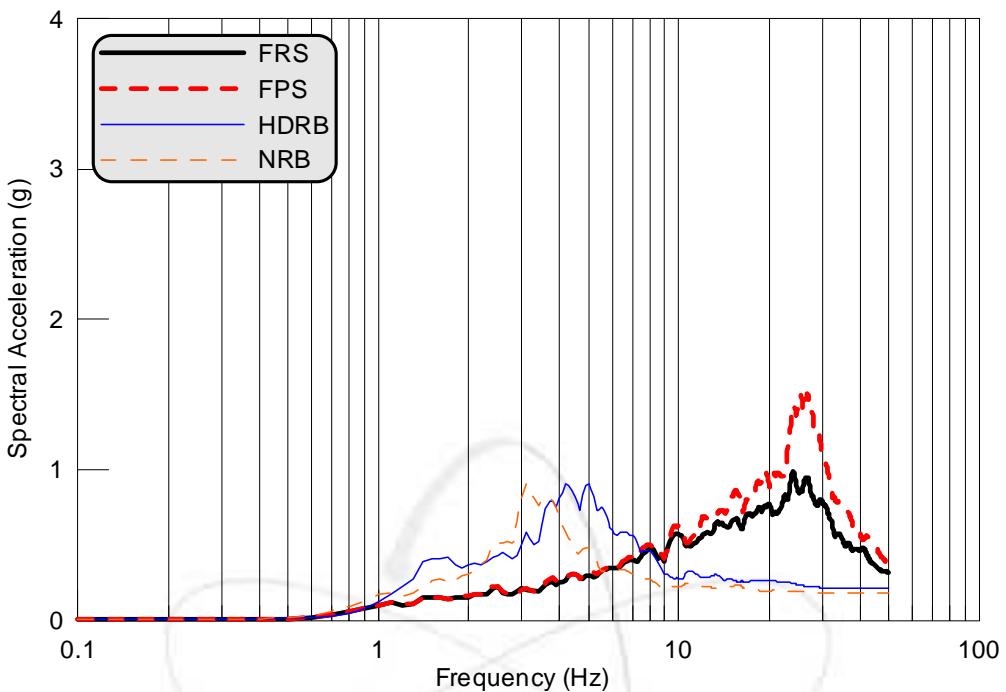




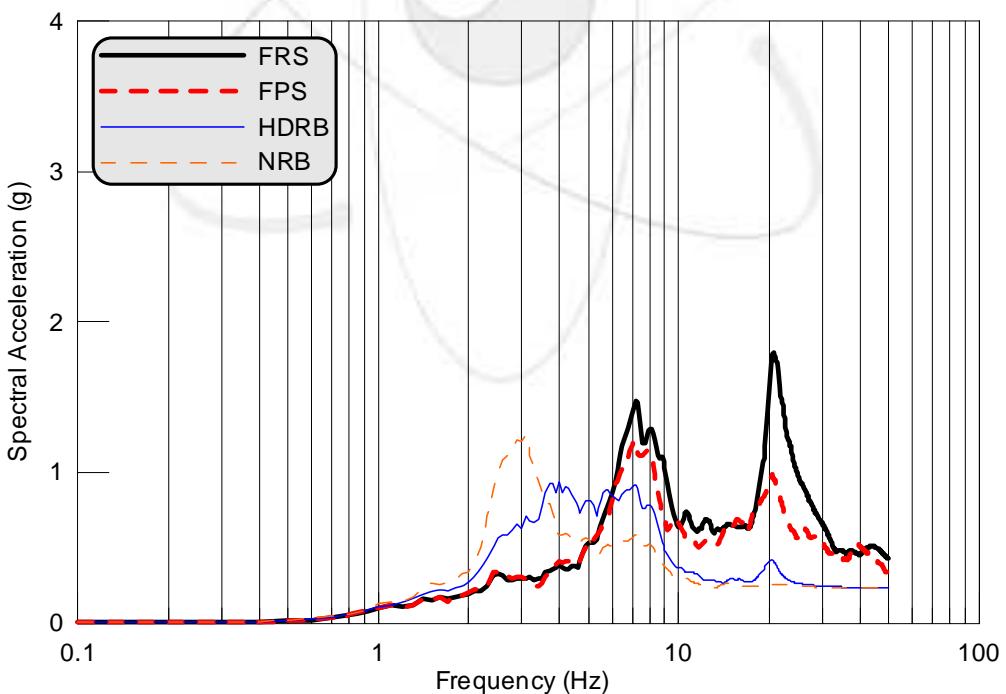
B.1 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.1g)



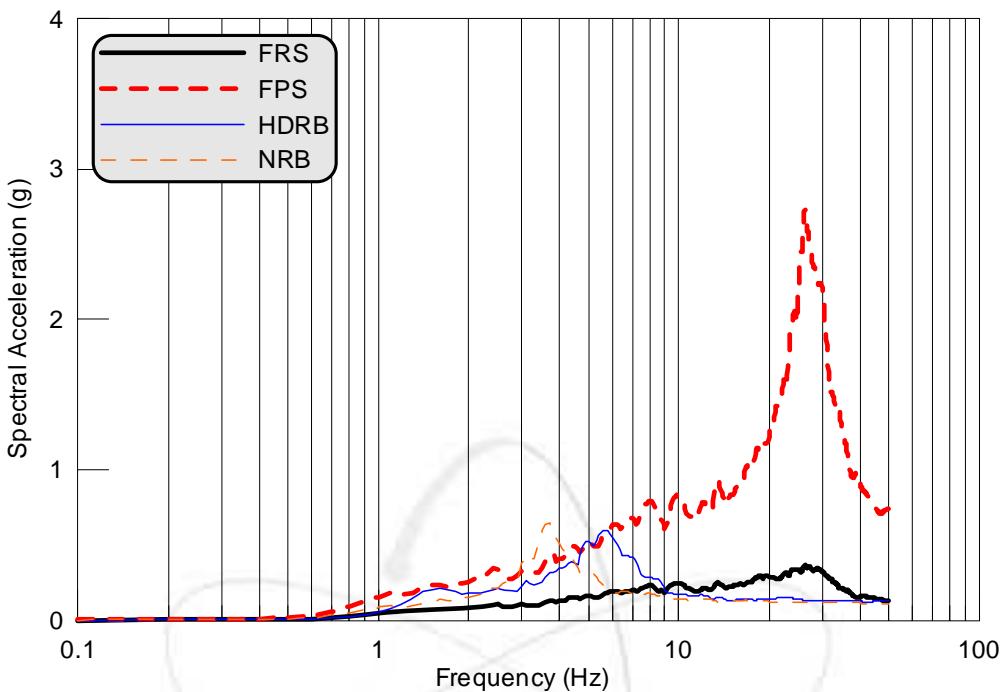
B.2 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.1g)



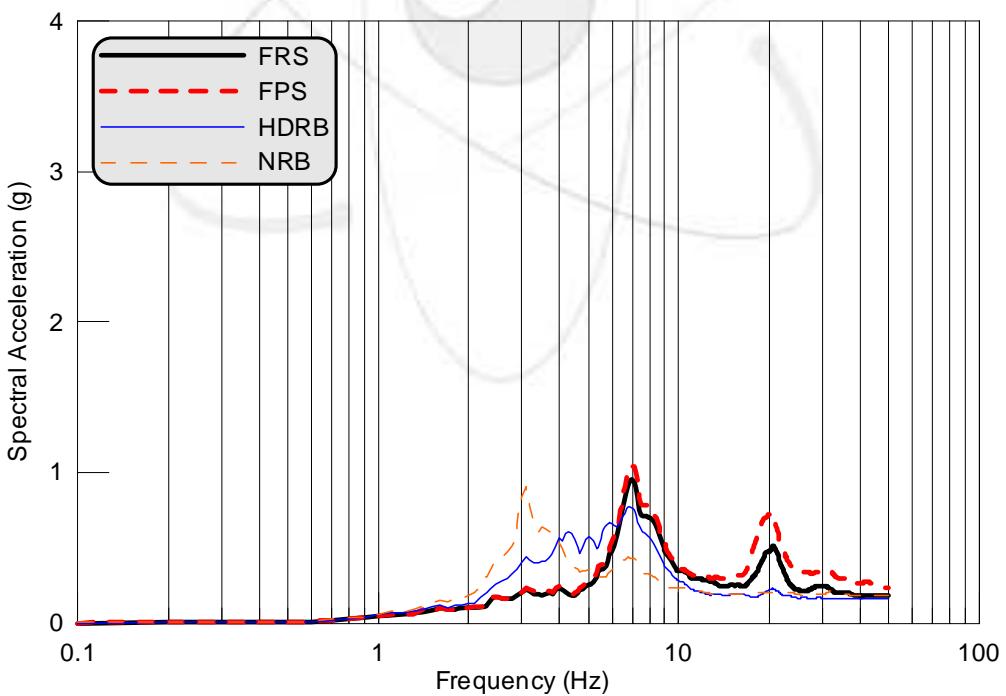
B.3 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.2g)



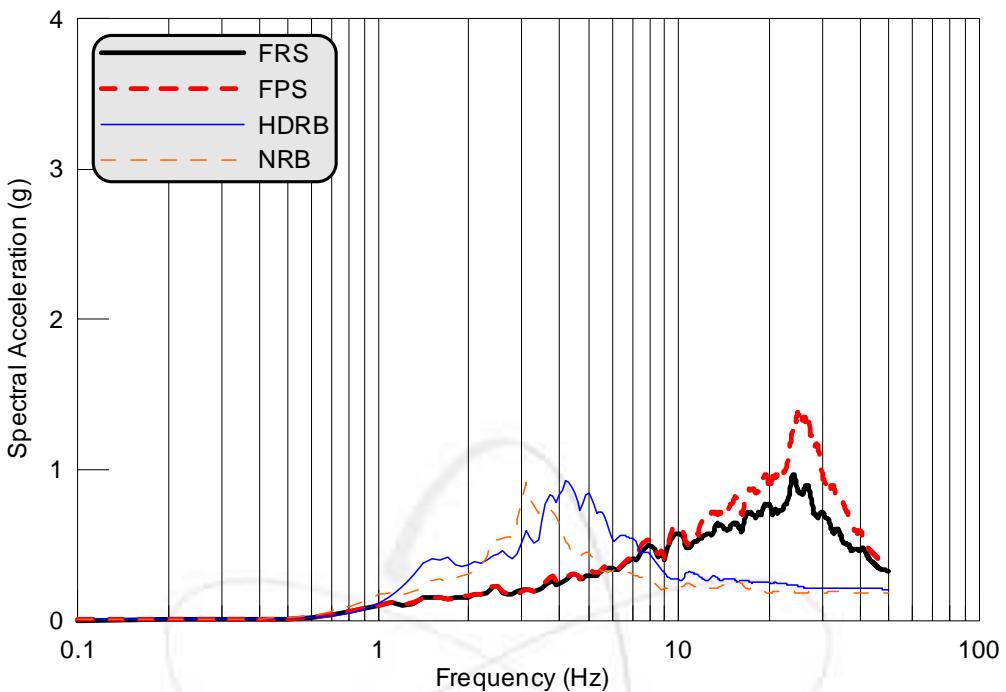
B.4 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.2g)



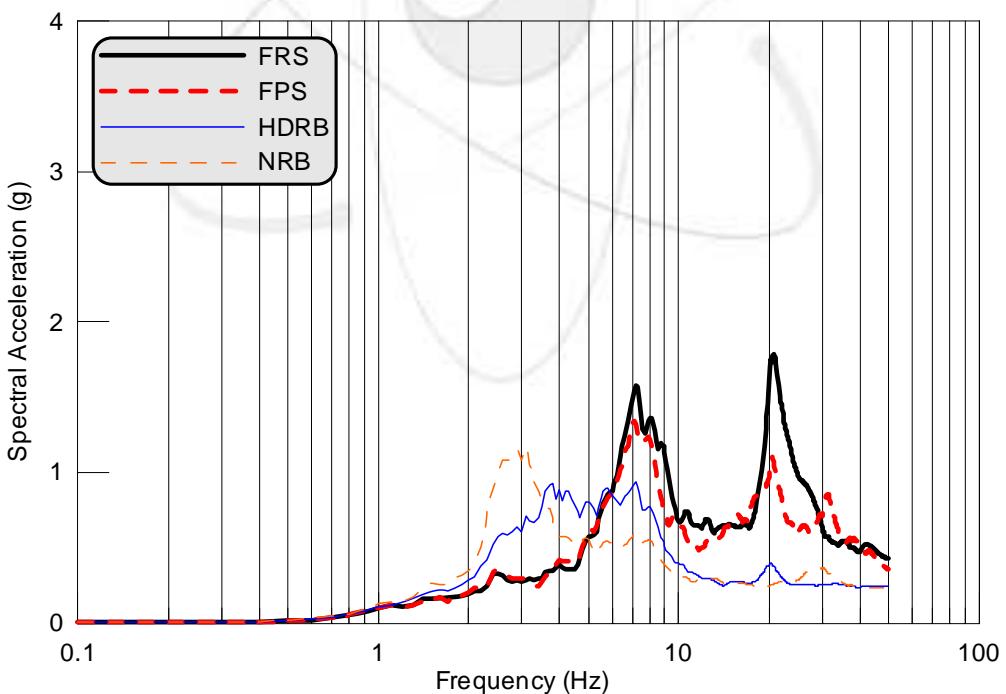
B.5 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.1g)



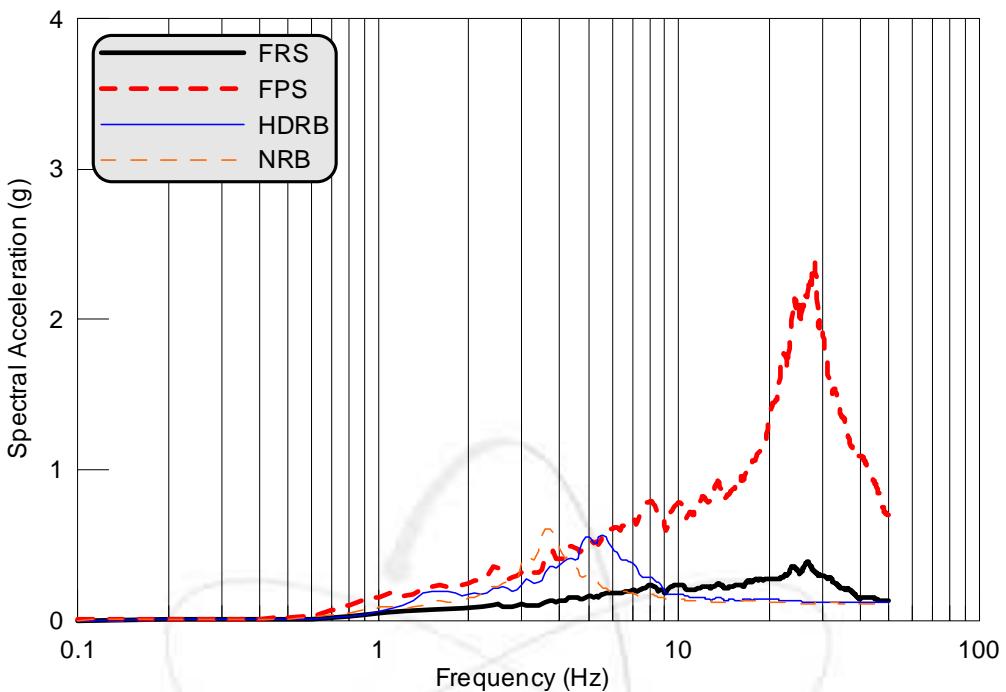
B.6 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.1g)



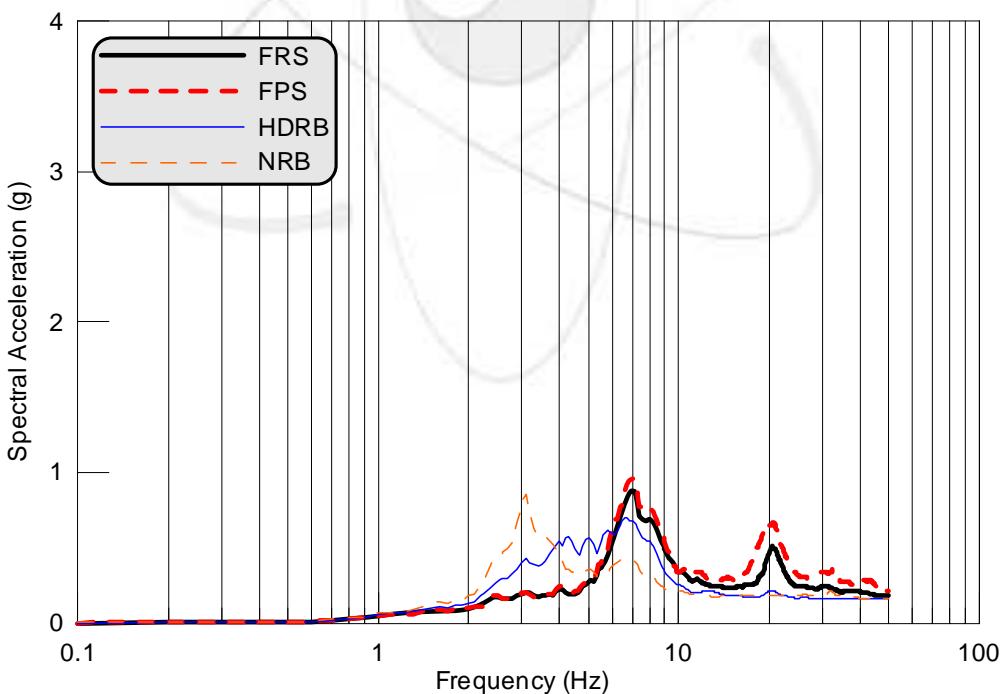
B.7 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.2g)



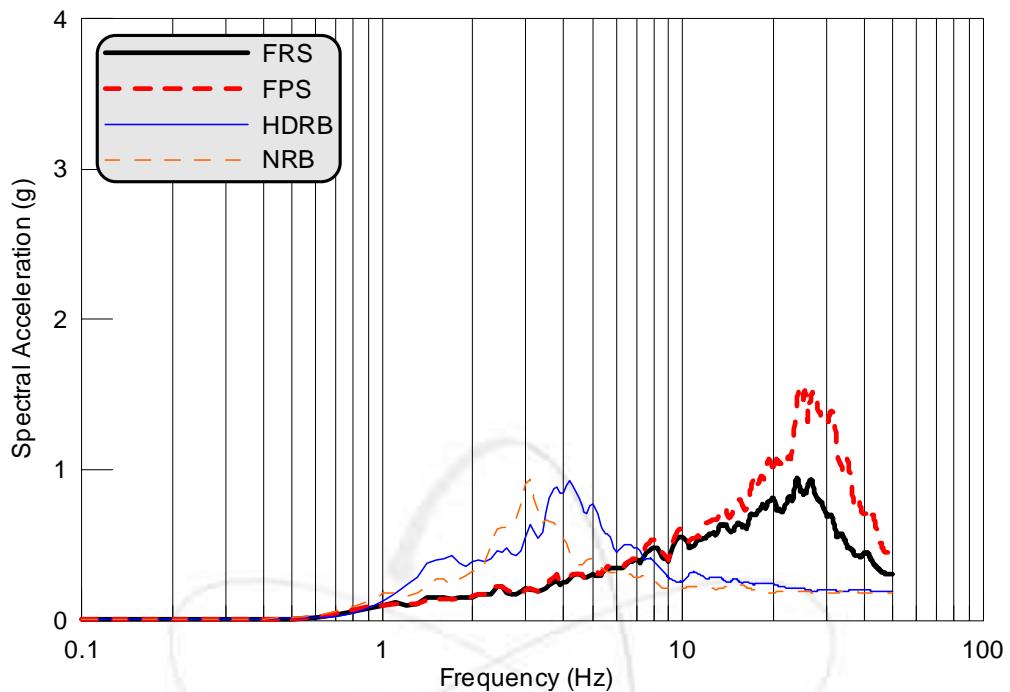
B.8 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.2g)



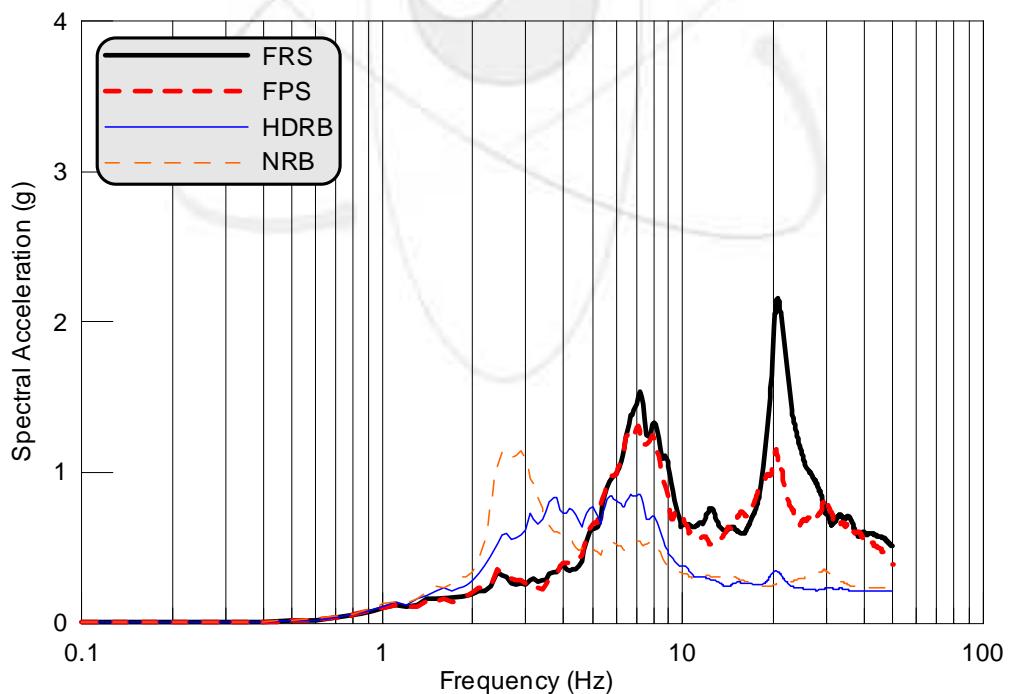
B.9 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



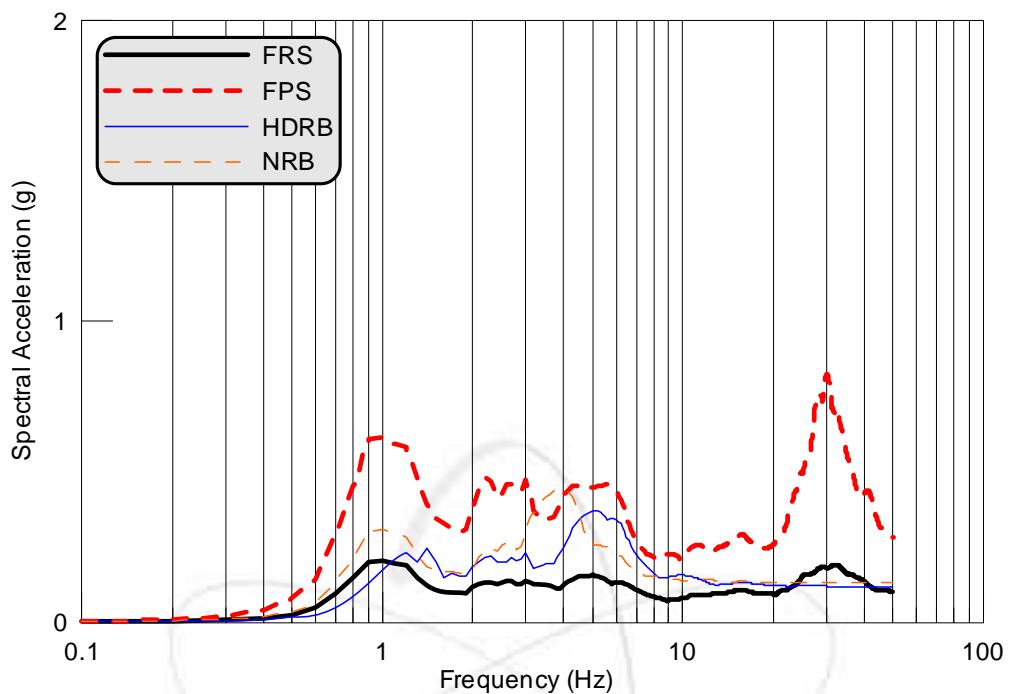
B.10 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



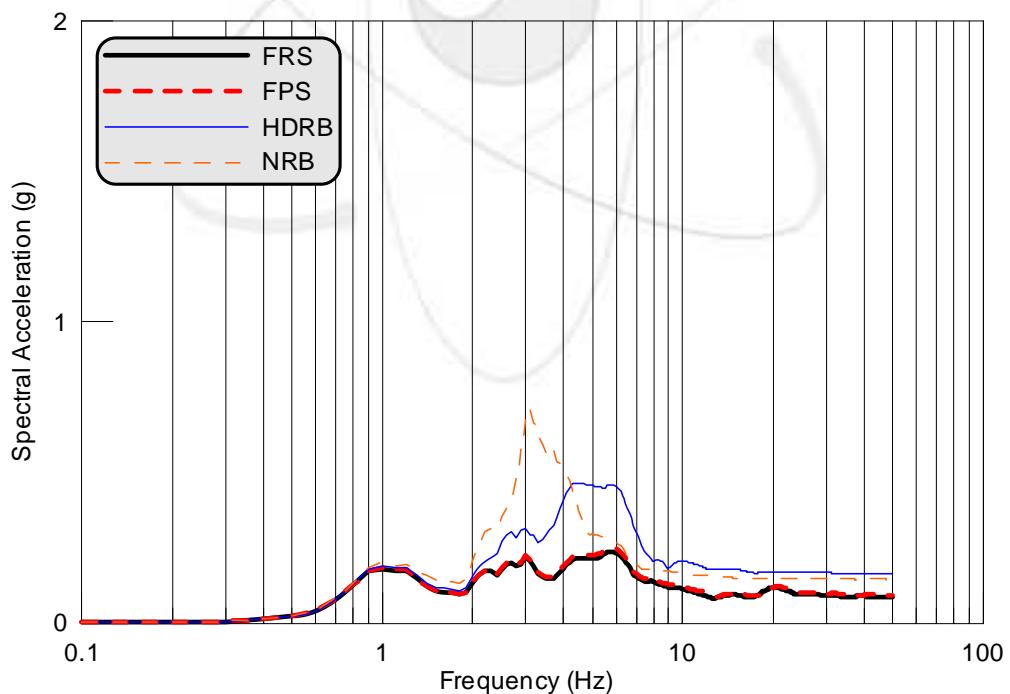
B.11 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.2g)



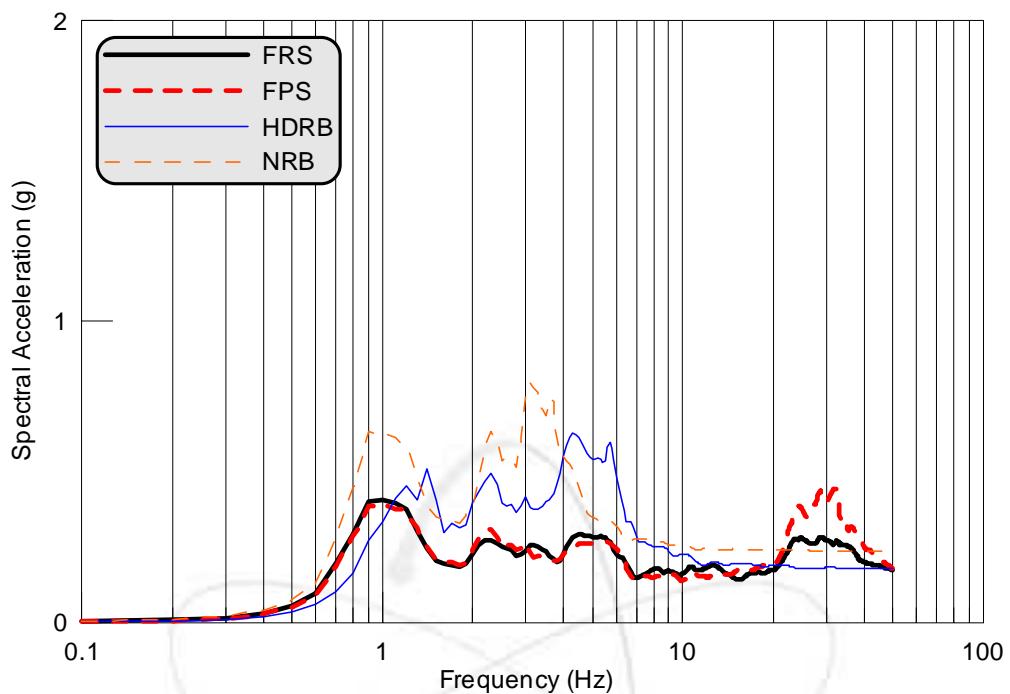
B.12 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.2g)



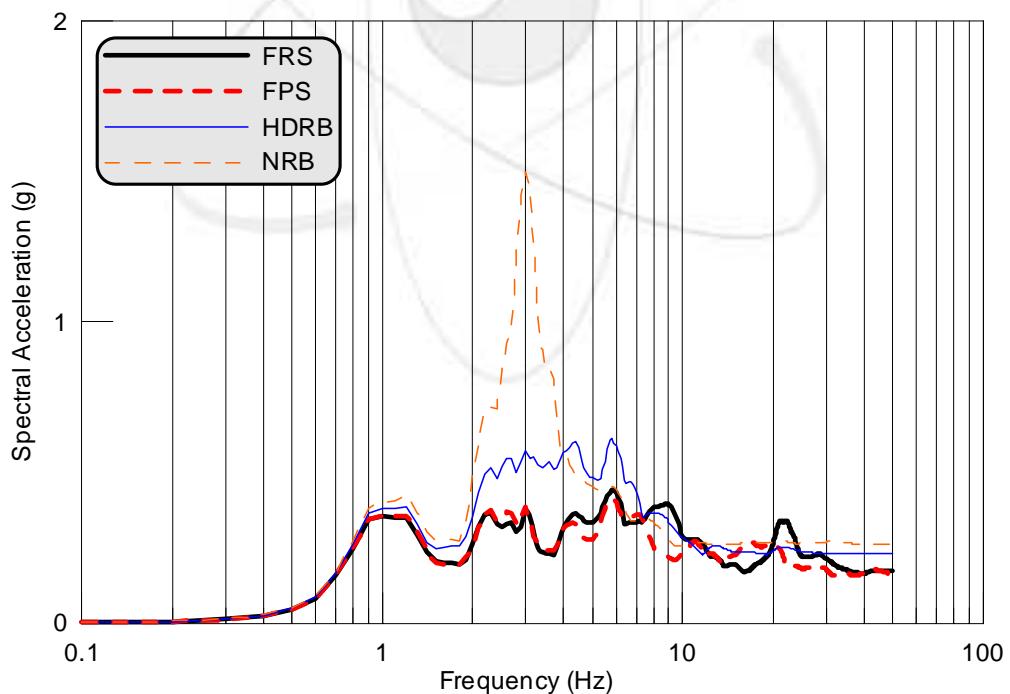
B.13 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)



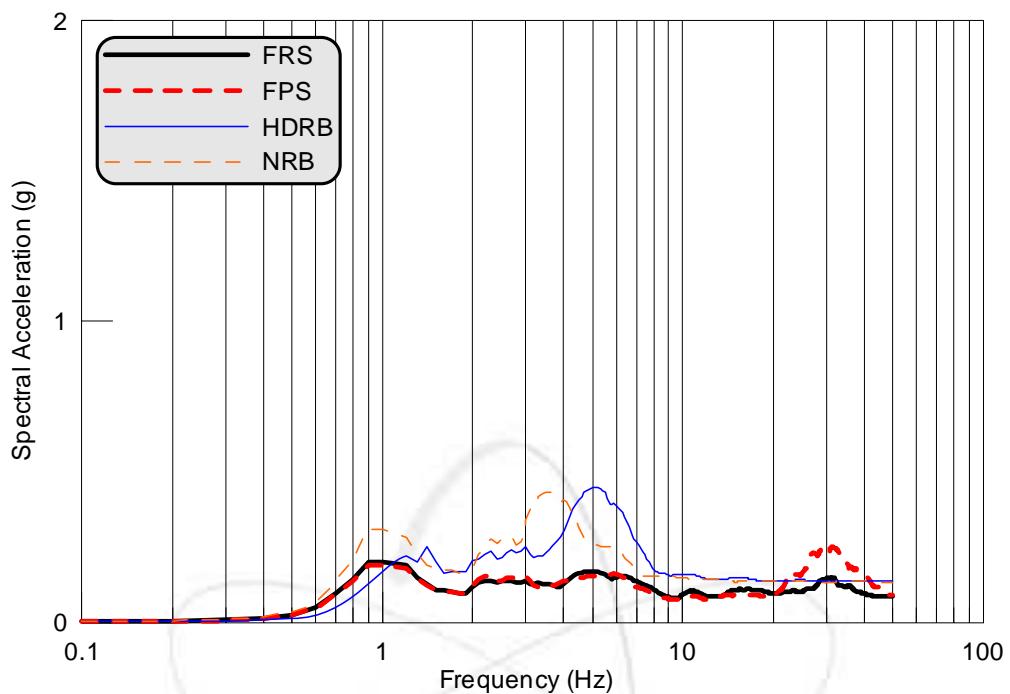
B.14 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)



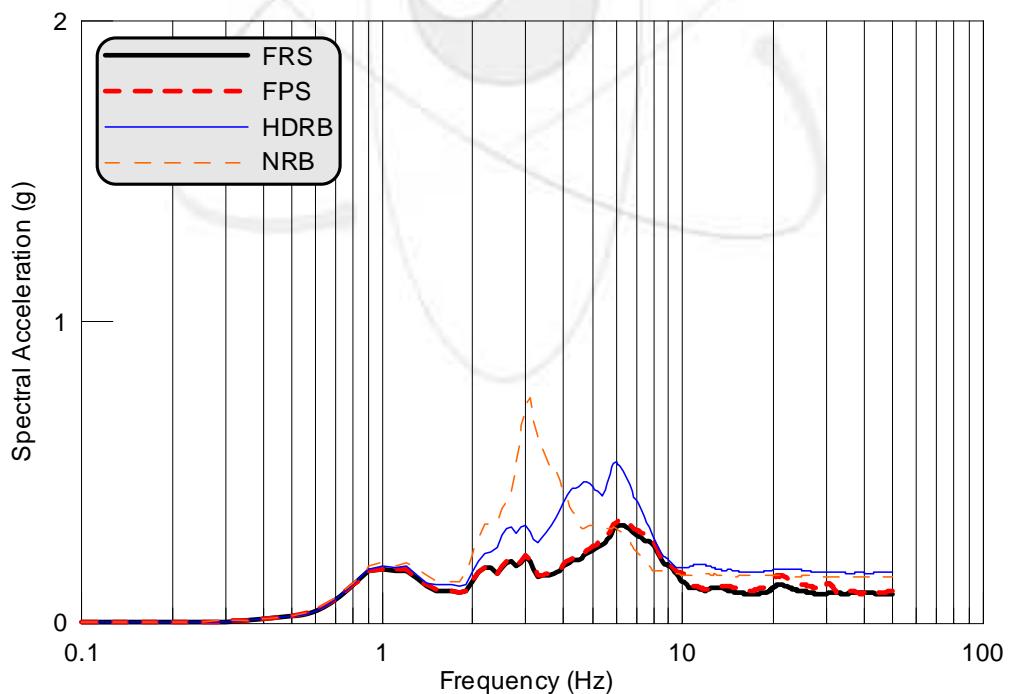
B.15 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.2g)



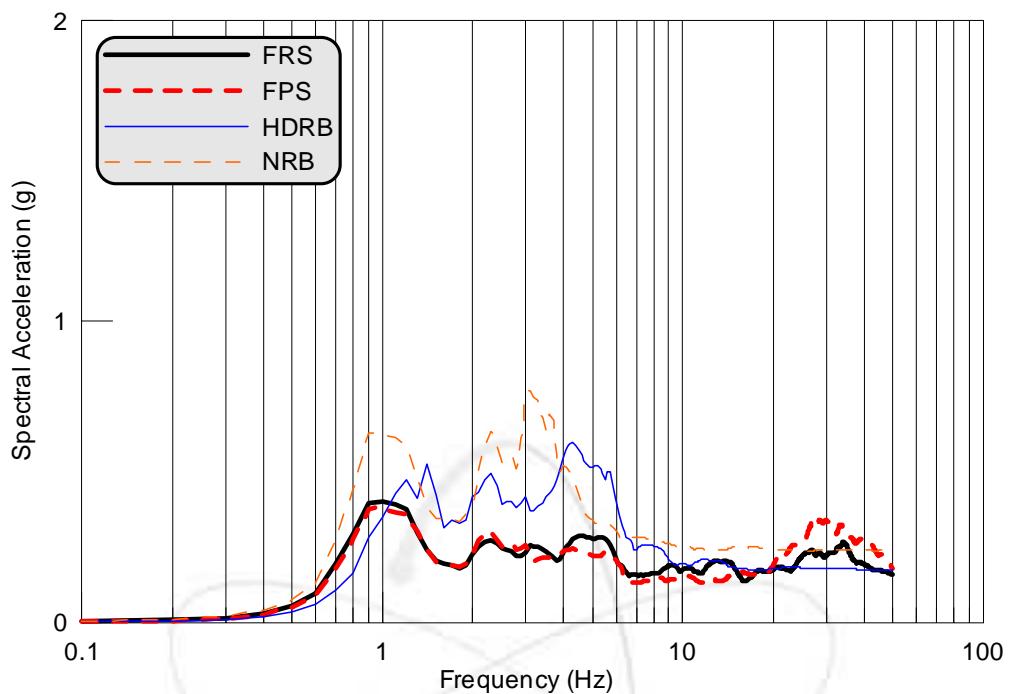
B.16 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.2g)



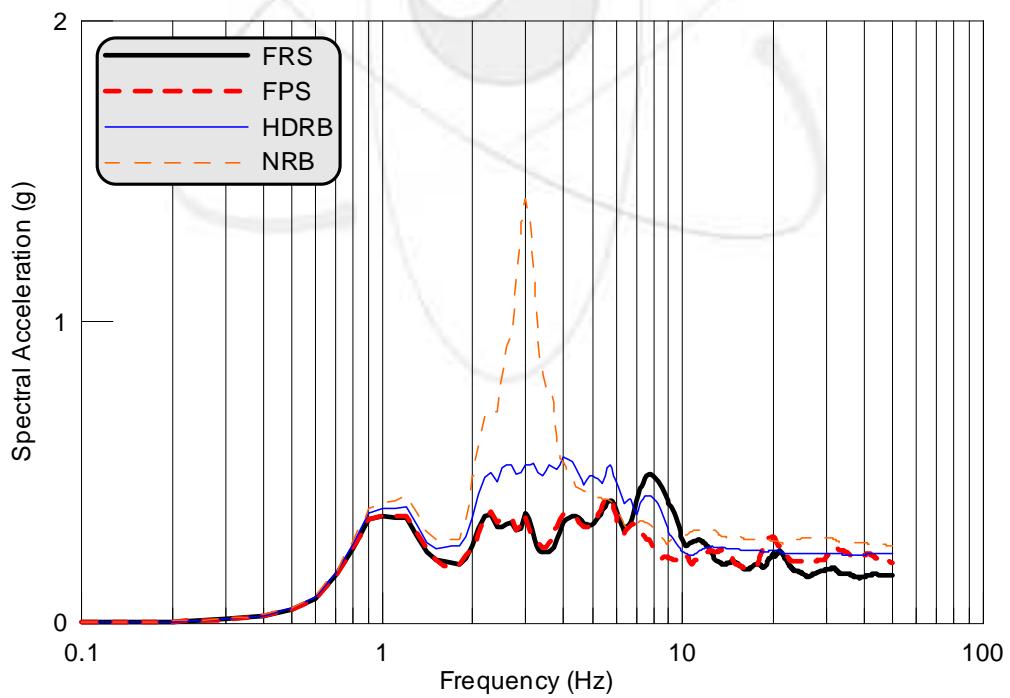
B.17 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.1g)



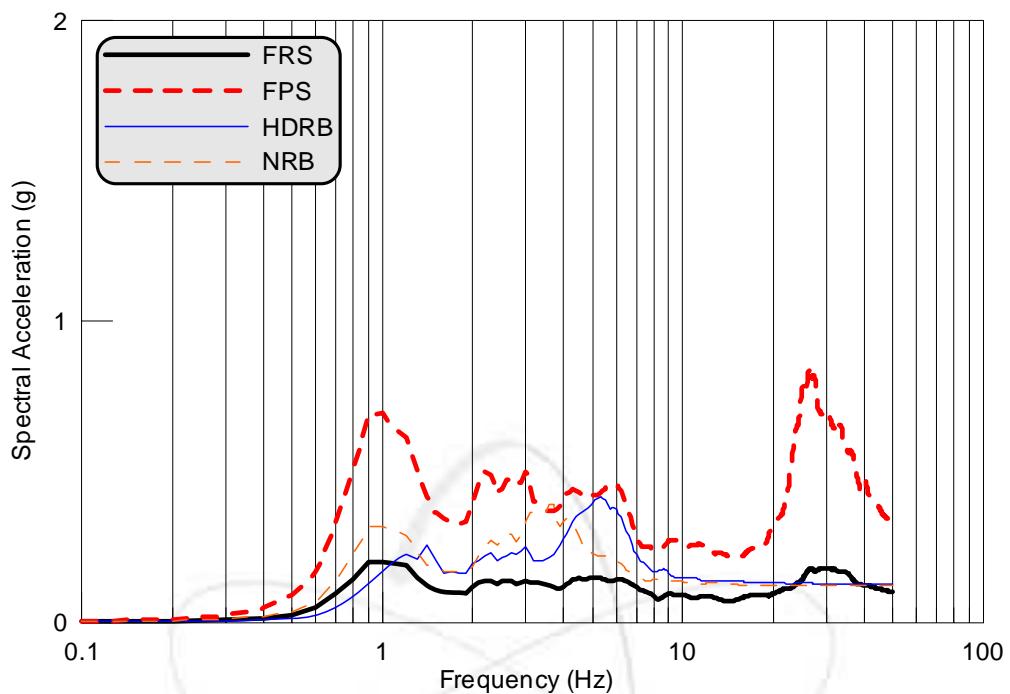
B.18 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.1g)



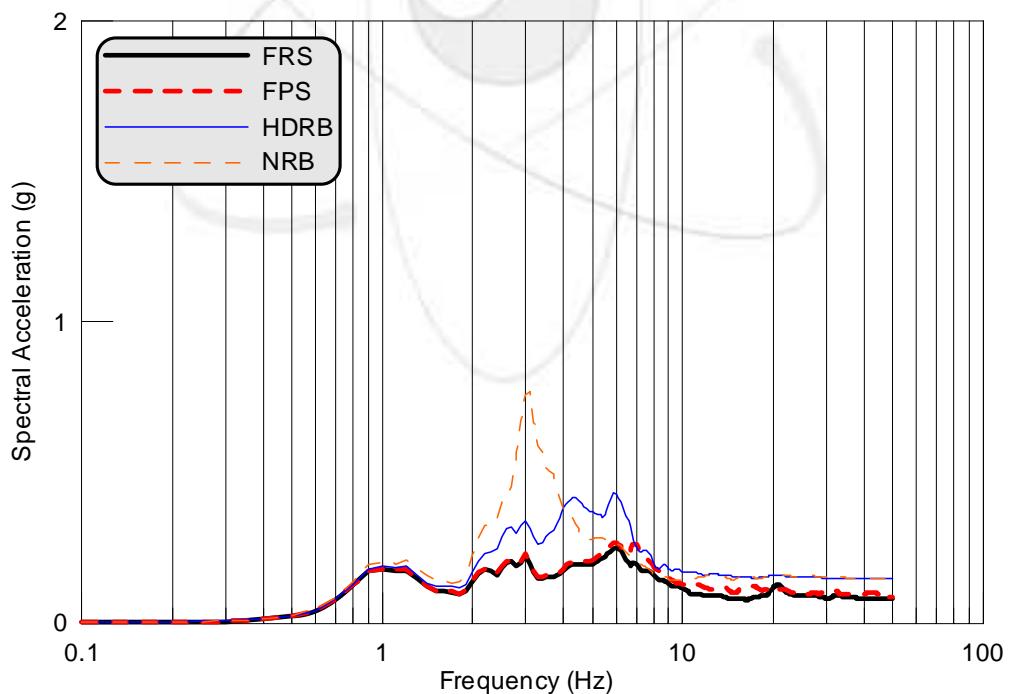
B.19 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.2g)



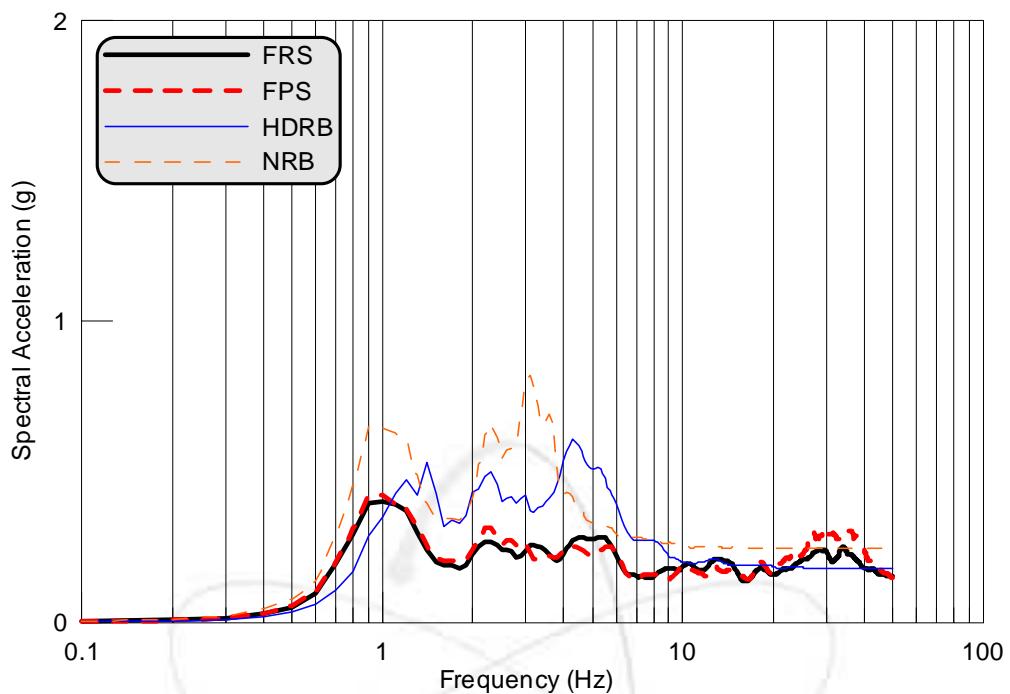
B.20 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.2g)



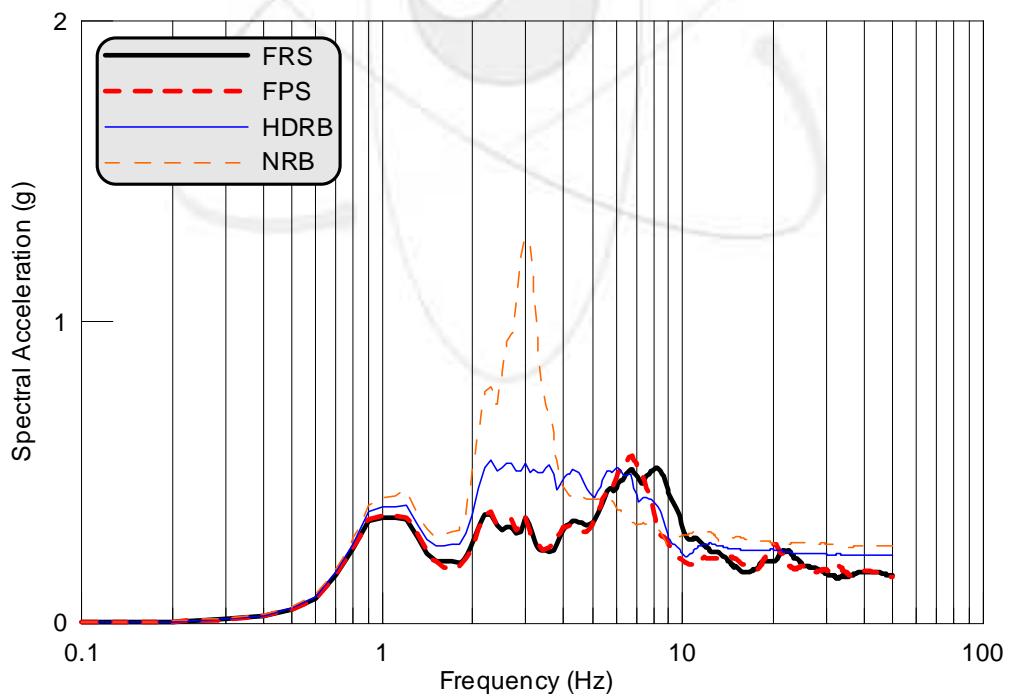
B.21 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)



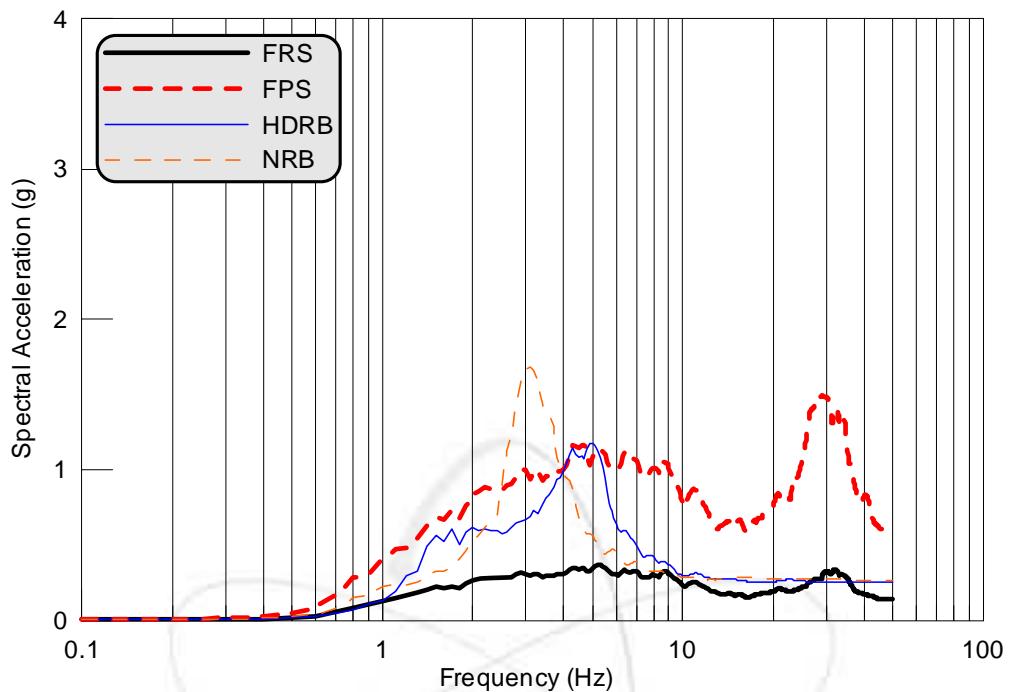
B.22 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)



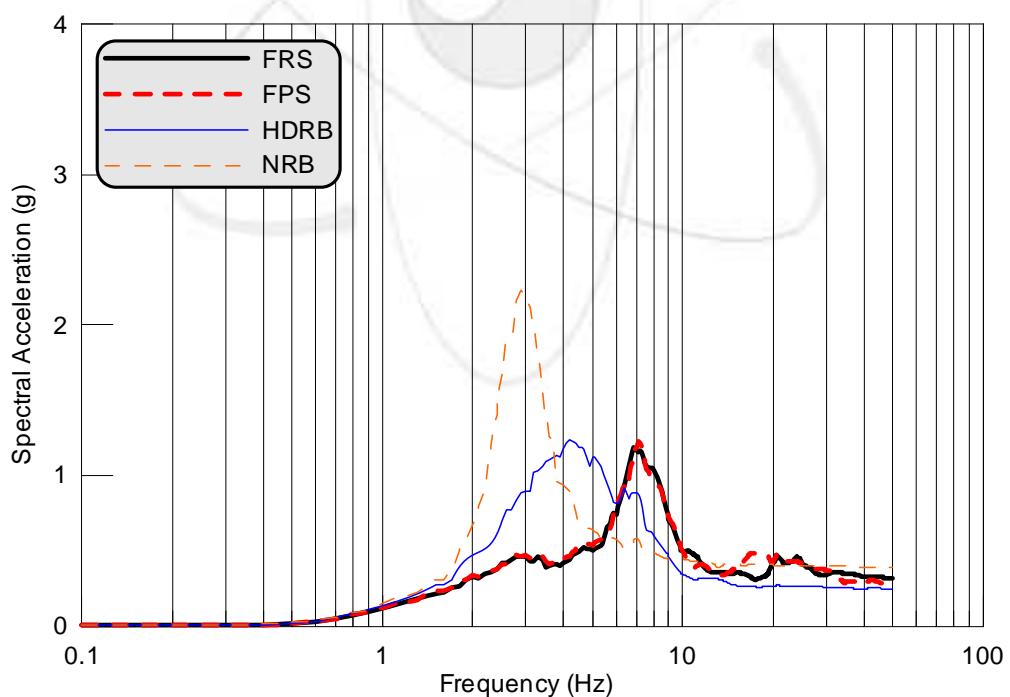
B.23 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.2g)



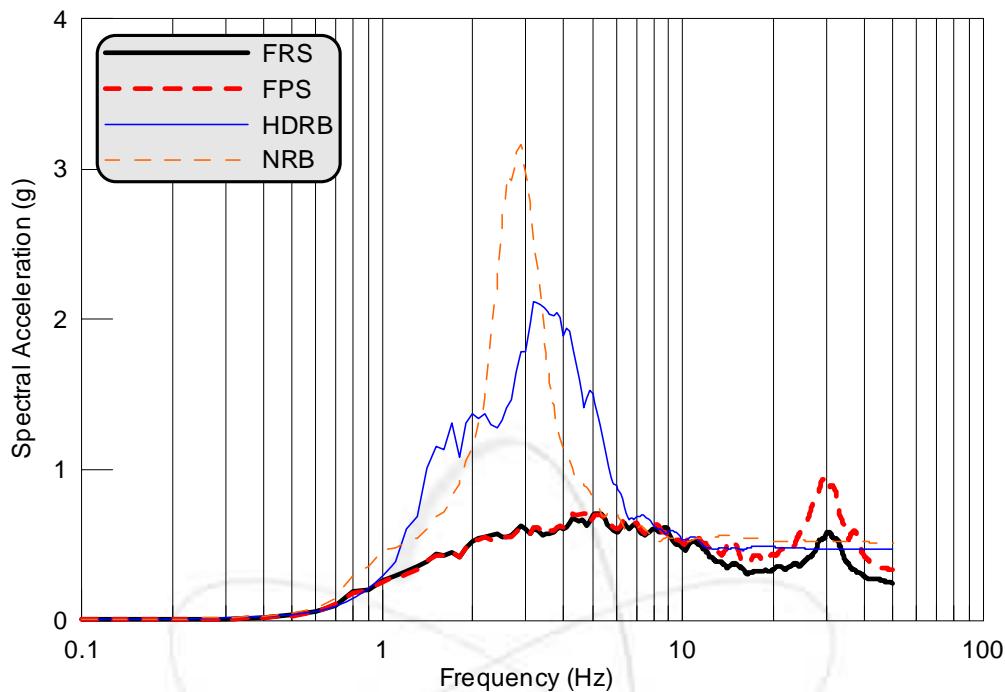
B.24 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.2g)



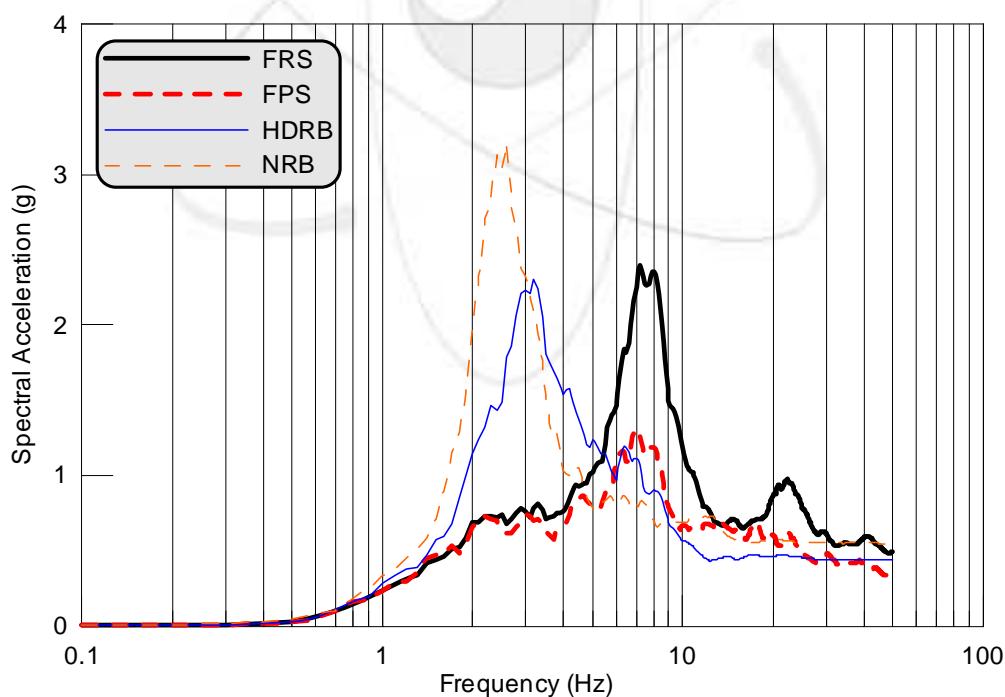
B.25 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)



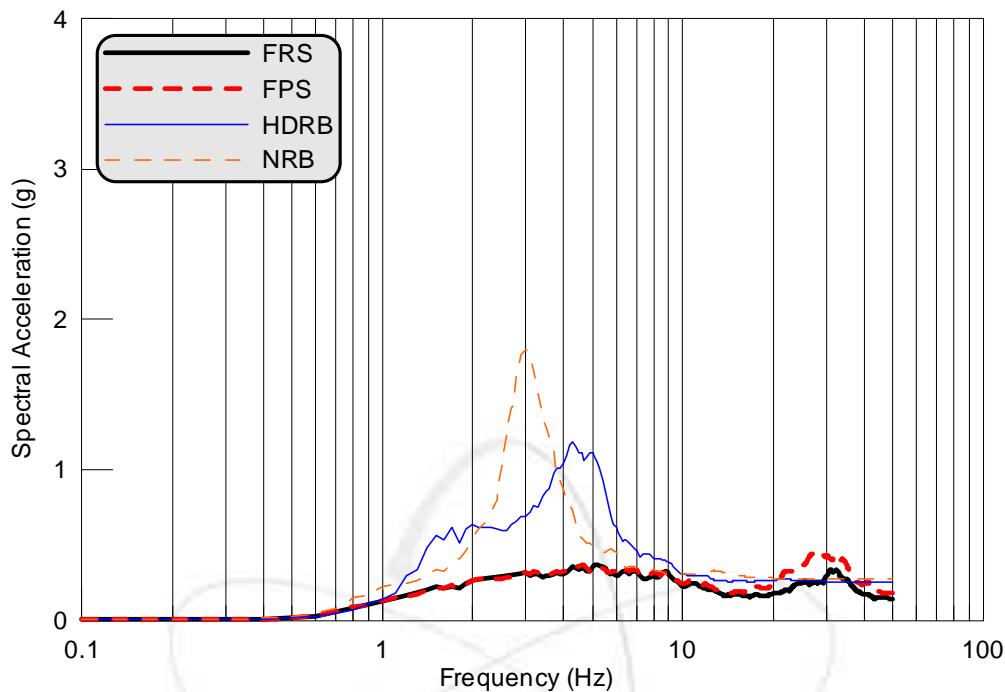
B.26 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)



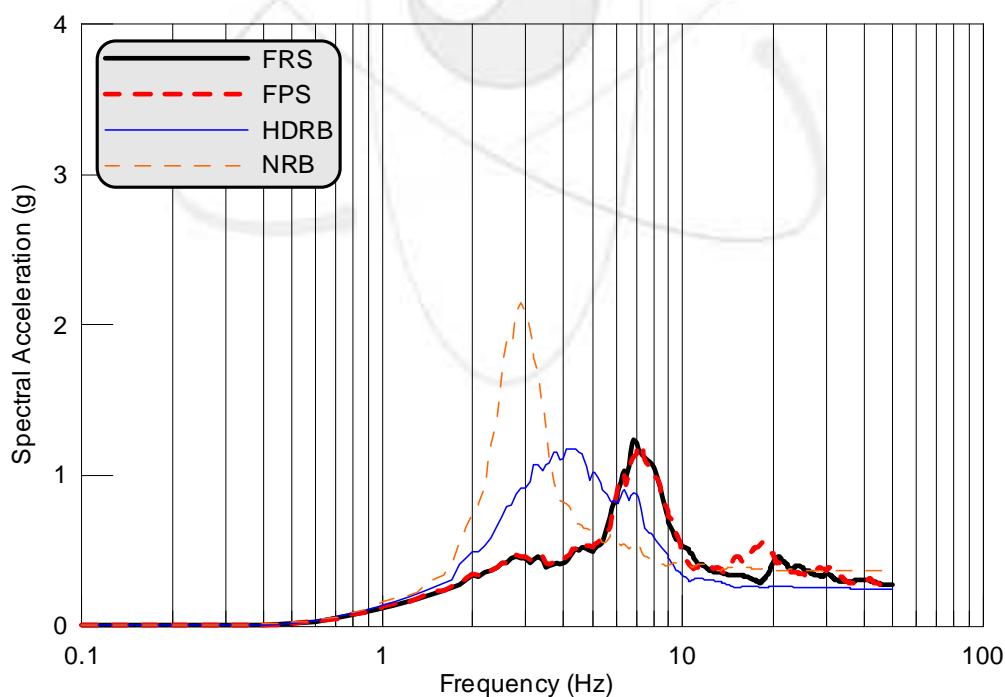
B.27 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.2g)



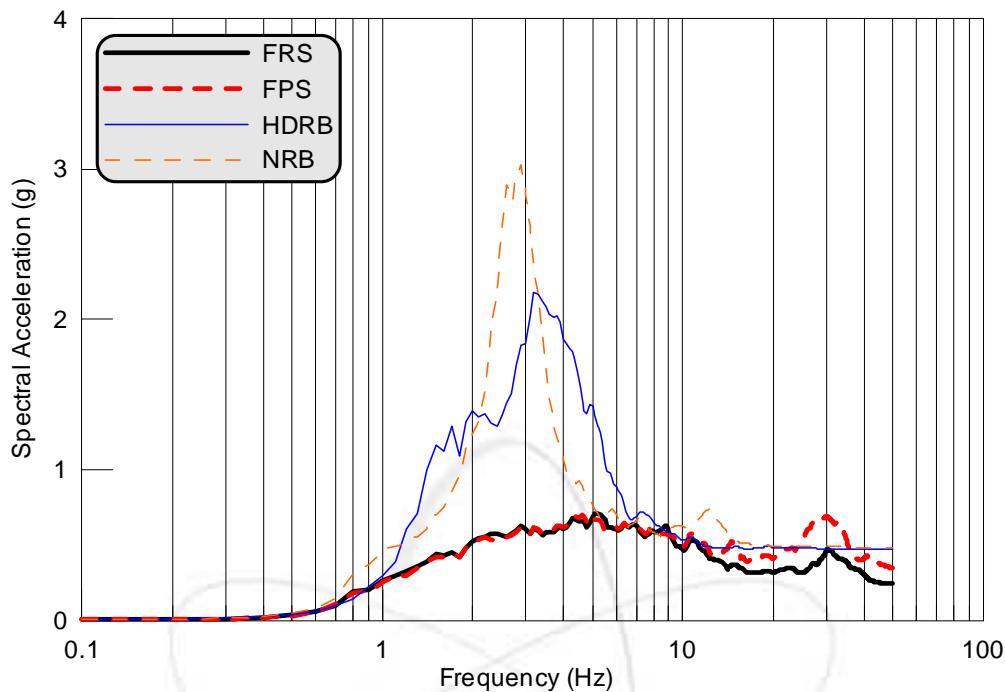
B.28 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.2g)



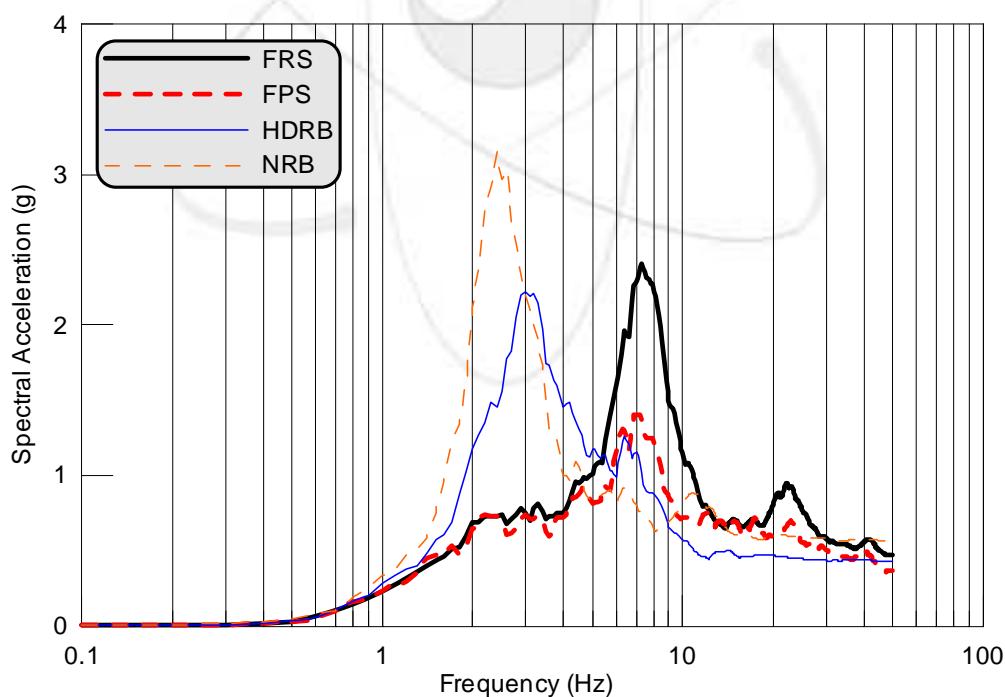
B.29 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.1g)



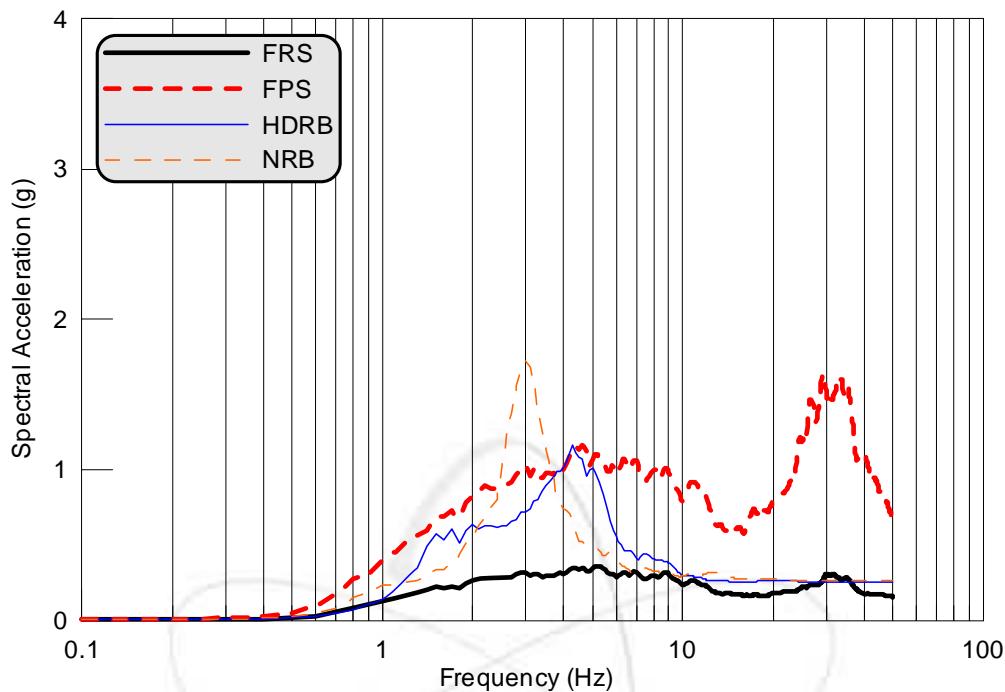
B.30 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.1g)



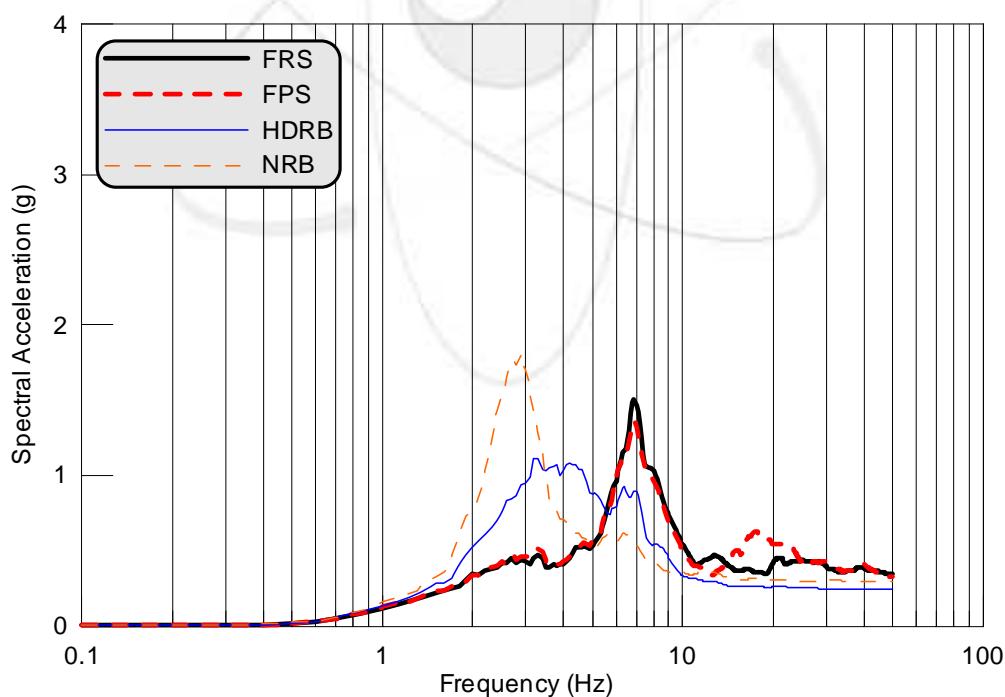
B.31 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.2g)



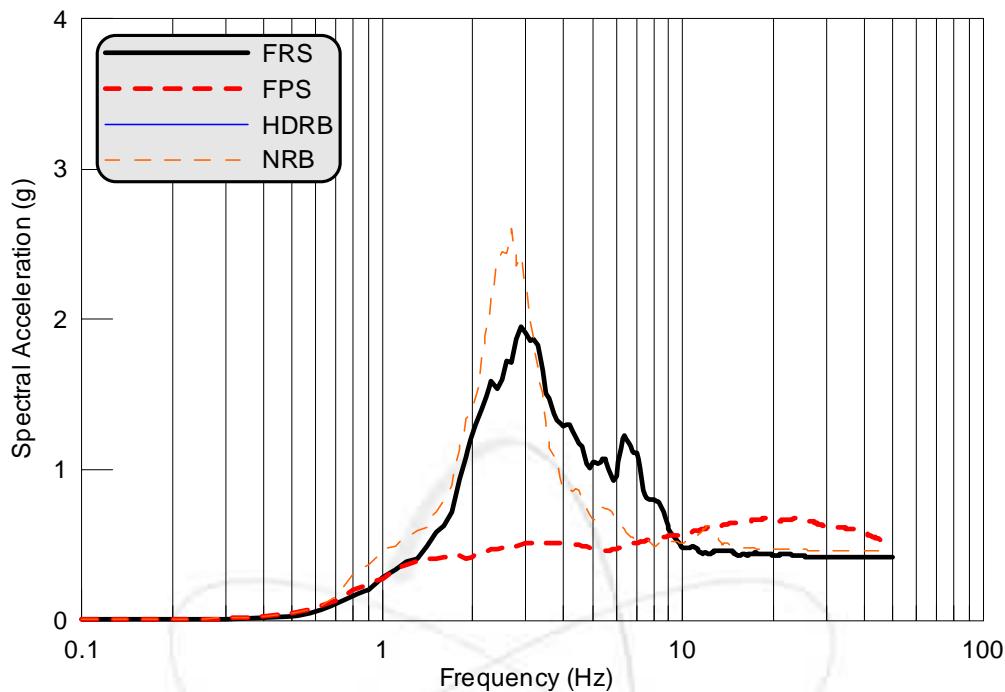
B.32 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.2g)



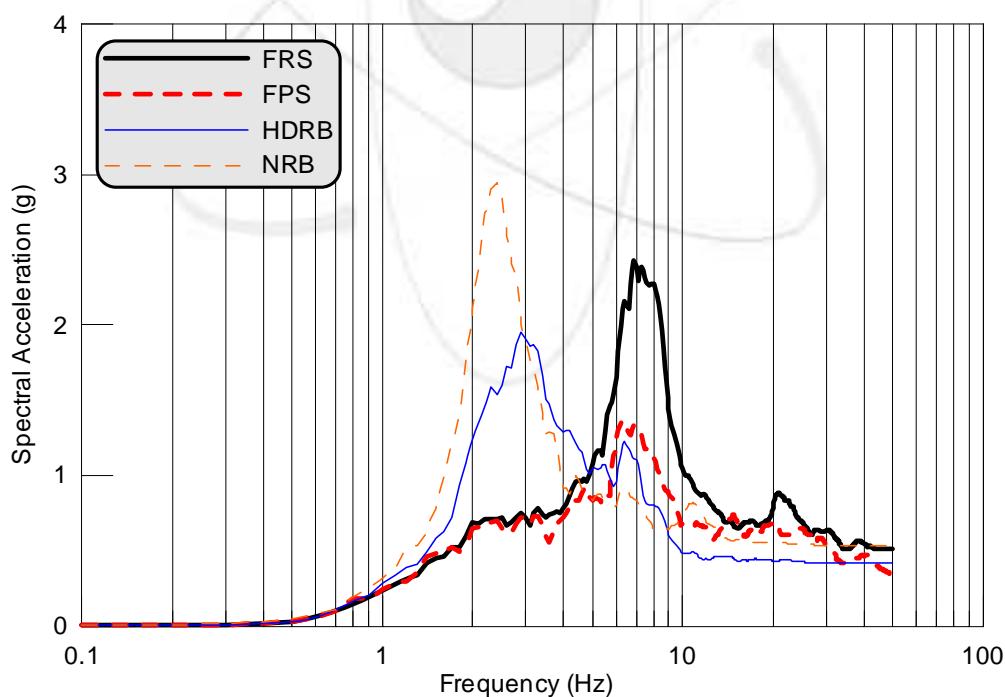
B.33 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)



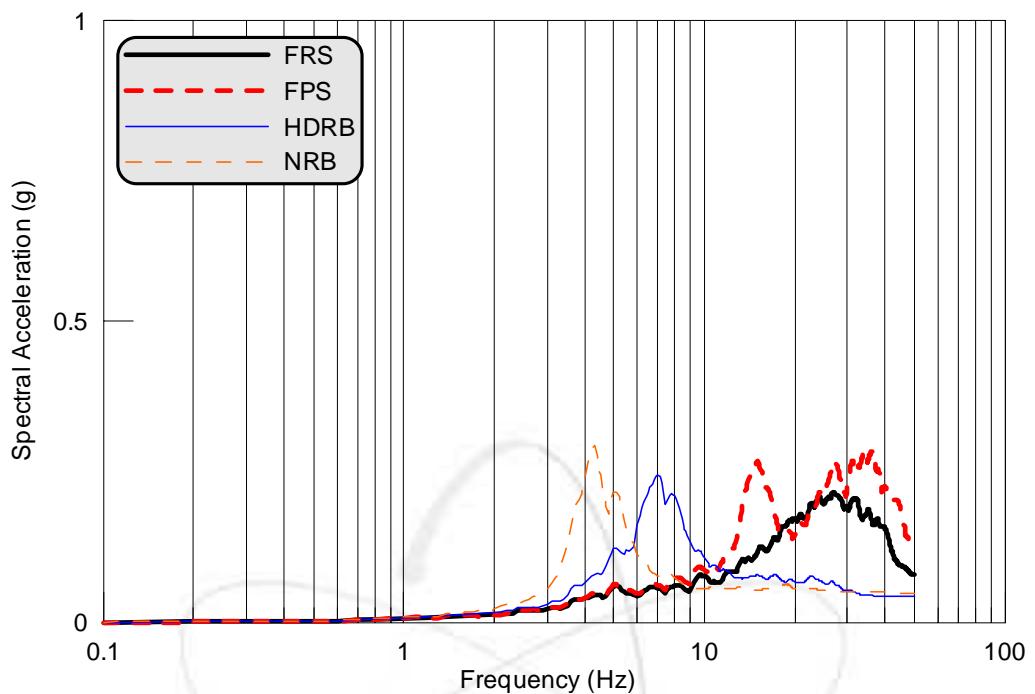
B.34 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)



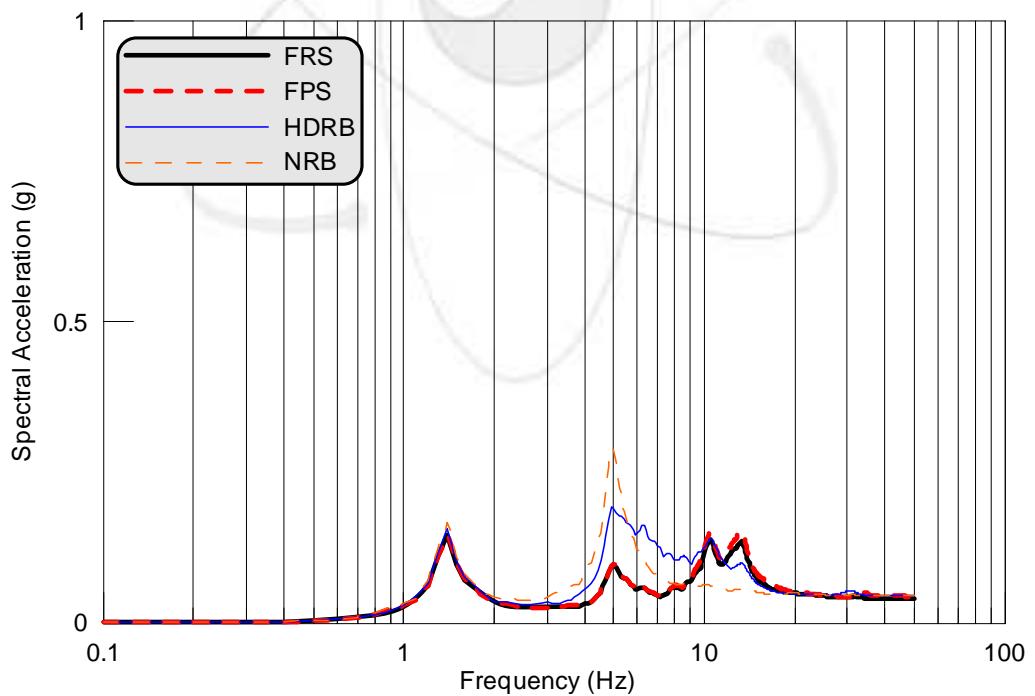
B.35 2층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.2g)



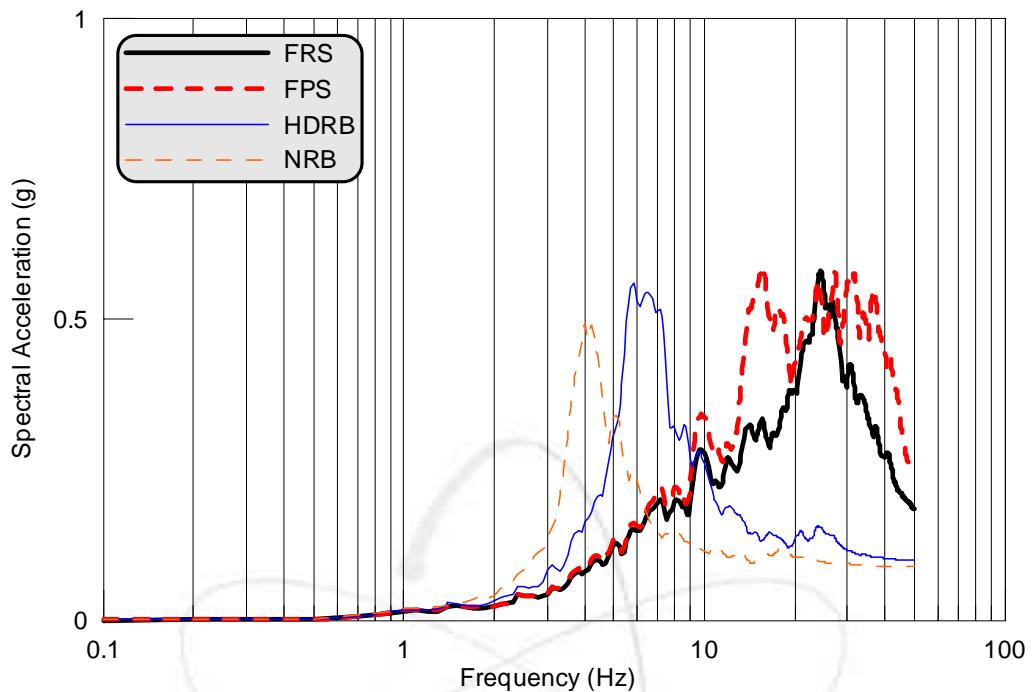
B.36 2층 구조물 2층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.2g)



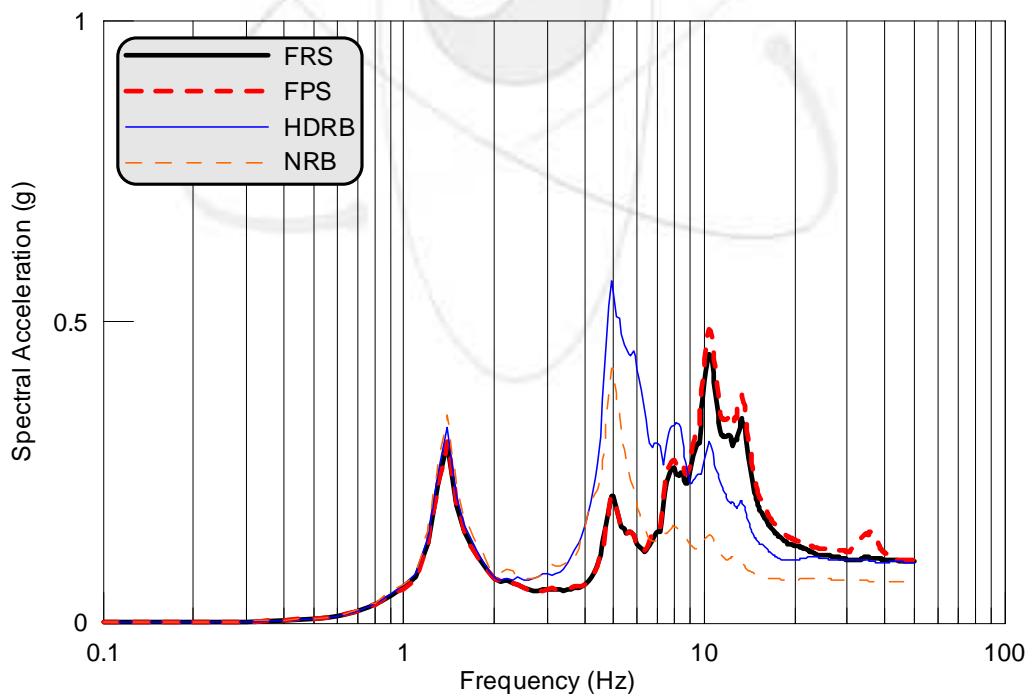
C.1 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.05g)



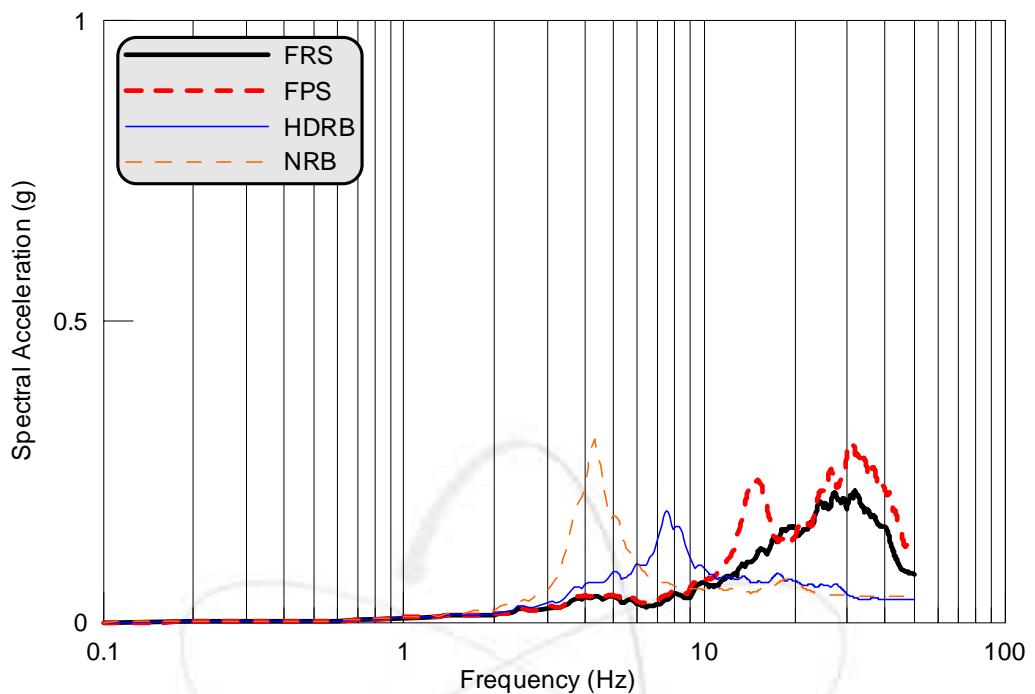
C.2 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.05g)



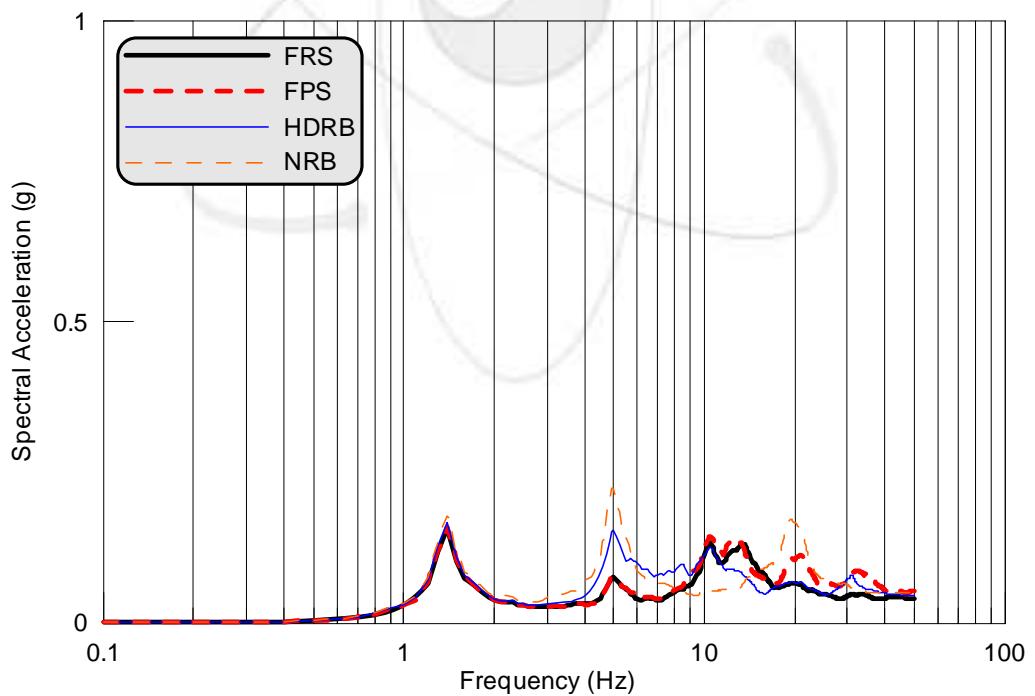
C.3 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.1g)



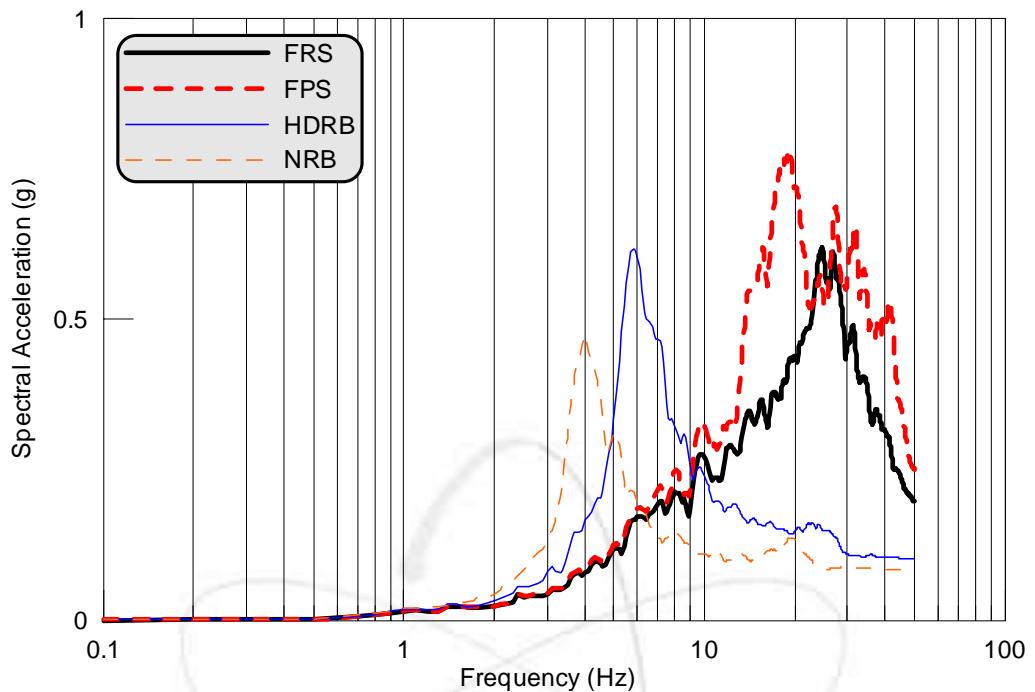
C.4 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 1D, 0.1g)



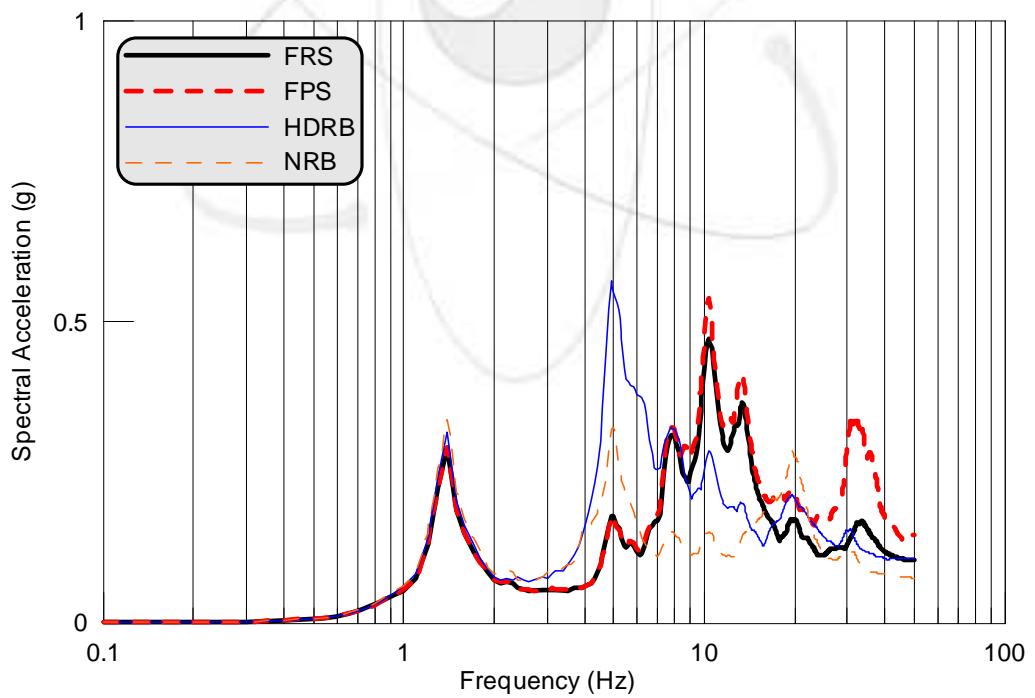
C.5 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.05g)



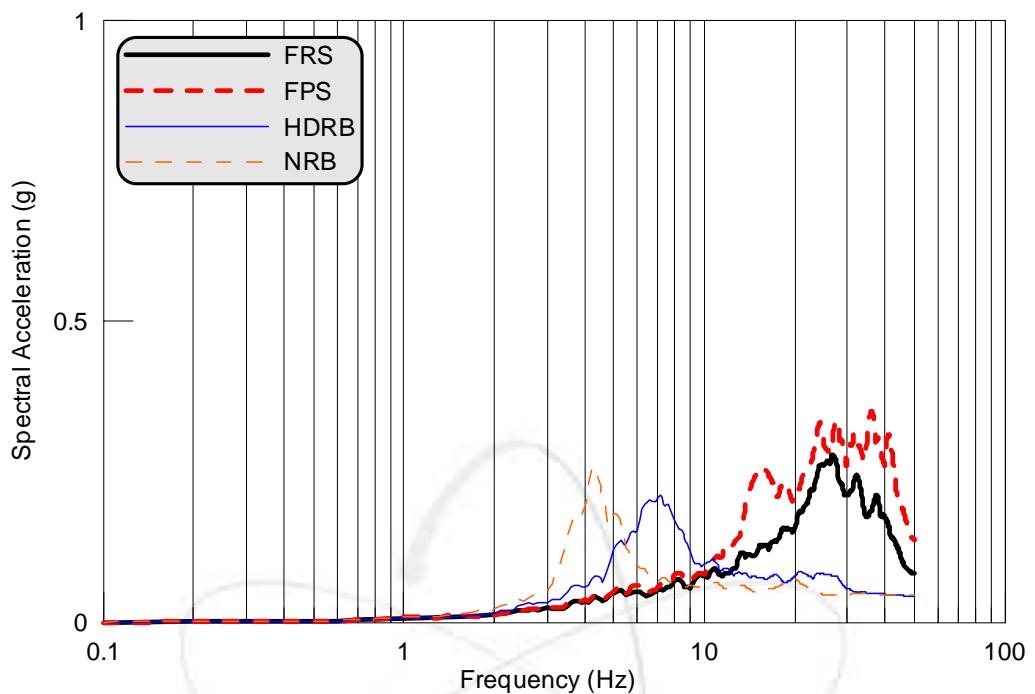
C.6 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.05g)



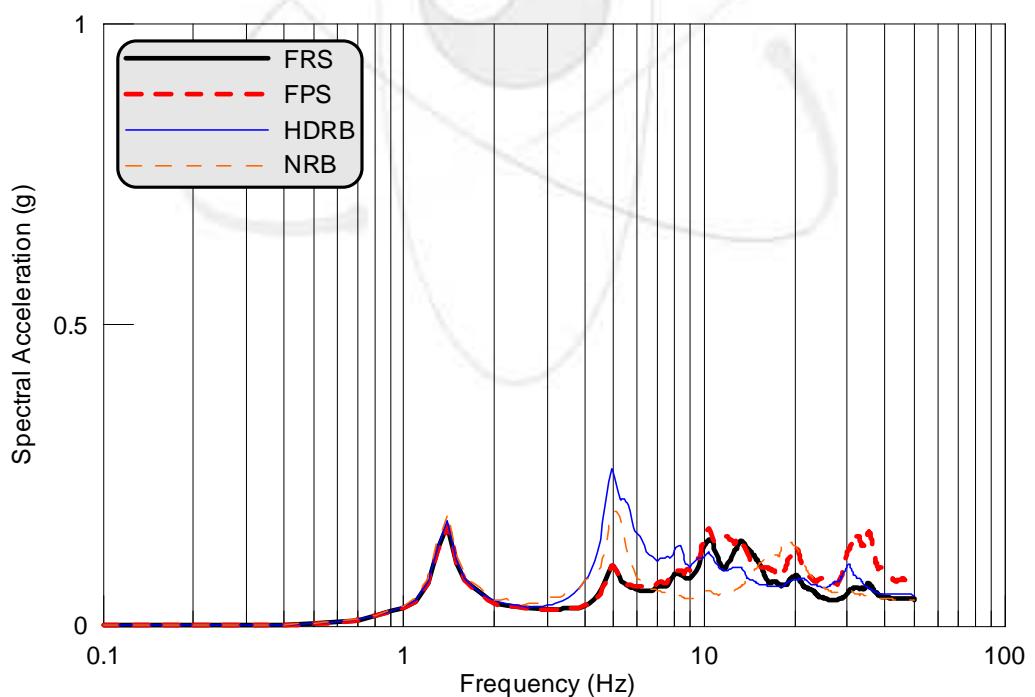
C.7 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.1g)



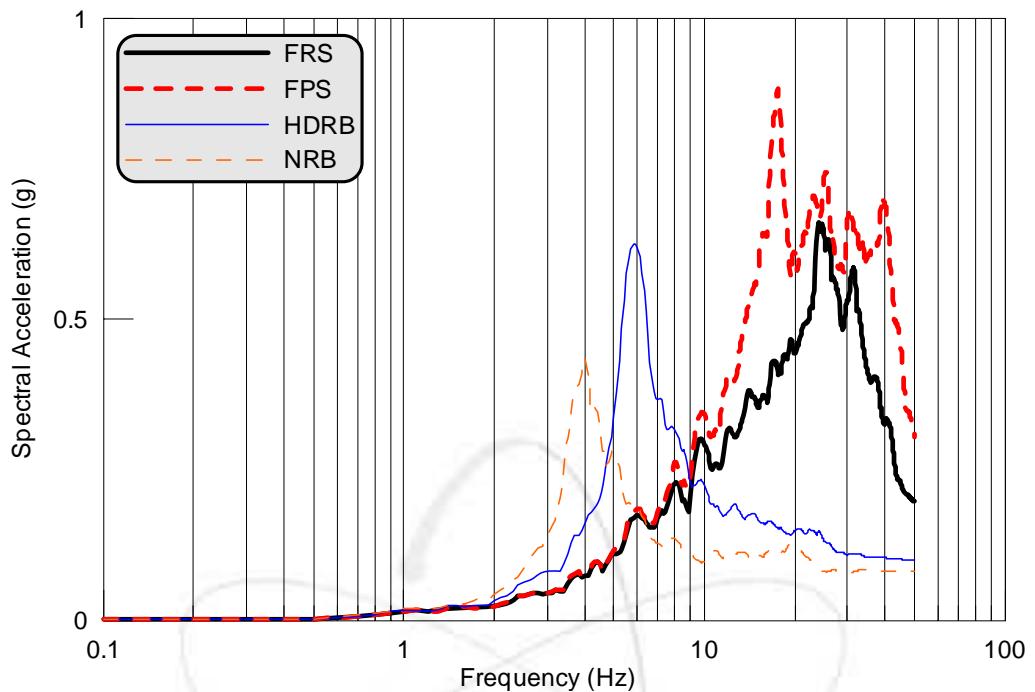
C.8 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 2D, 0.1g)



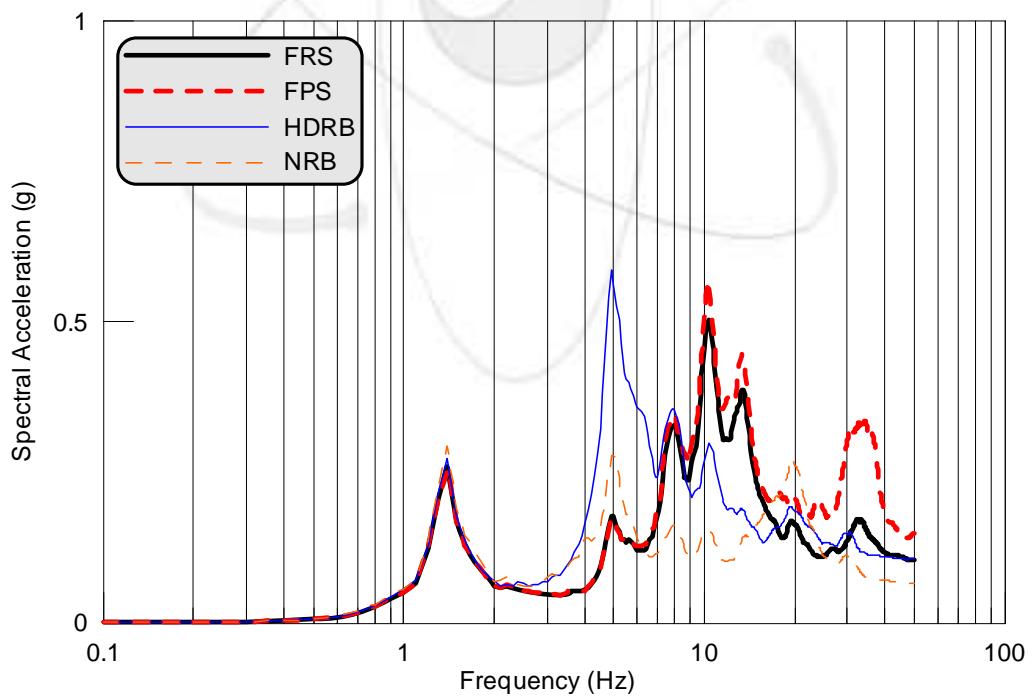
C.9 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.05g)



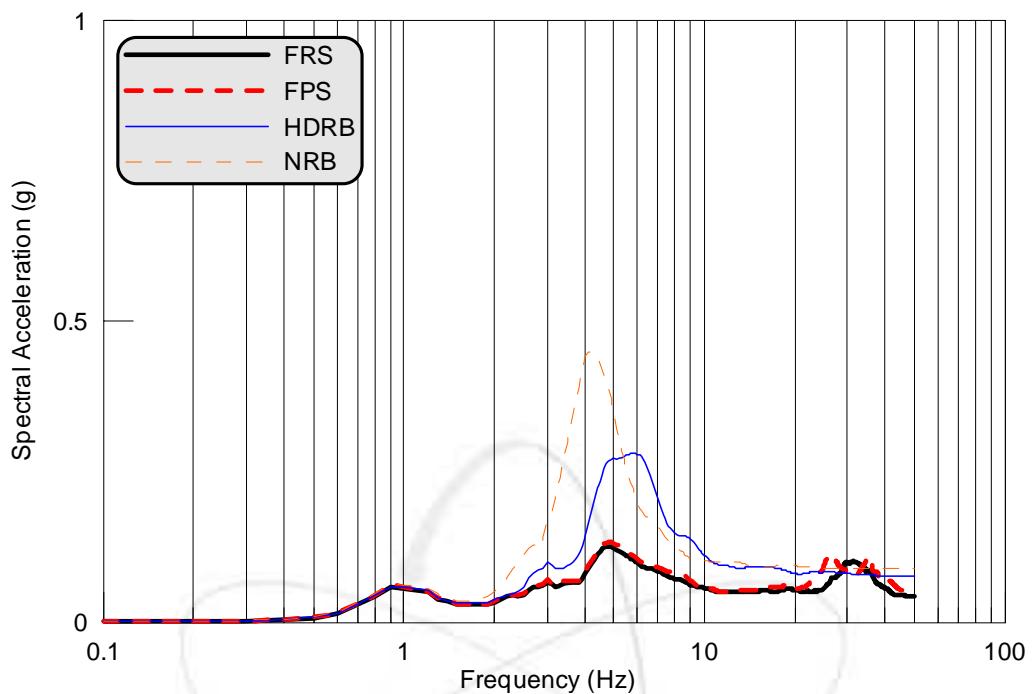
C.10 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.05g)



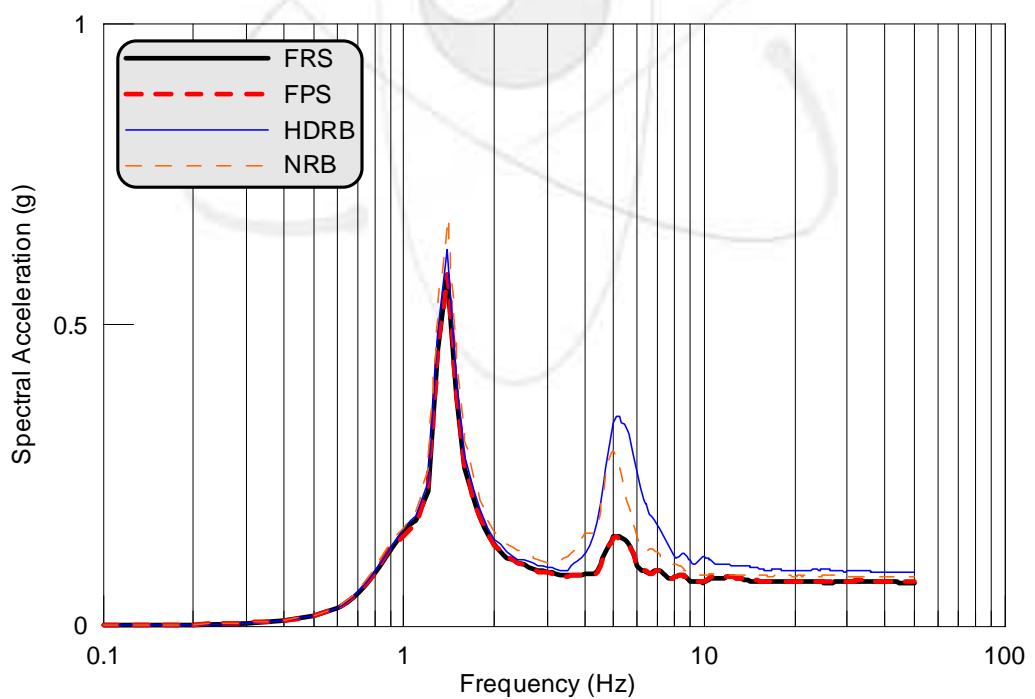
C.11 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



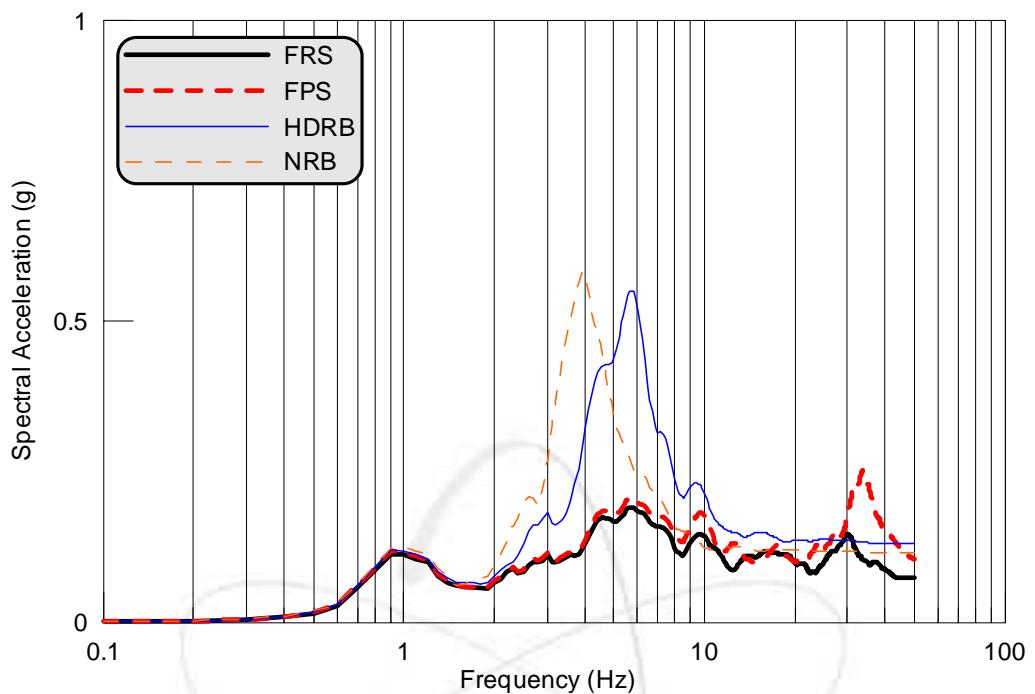
C.12 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (Scenario지진, 3D, 0.1g)



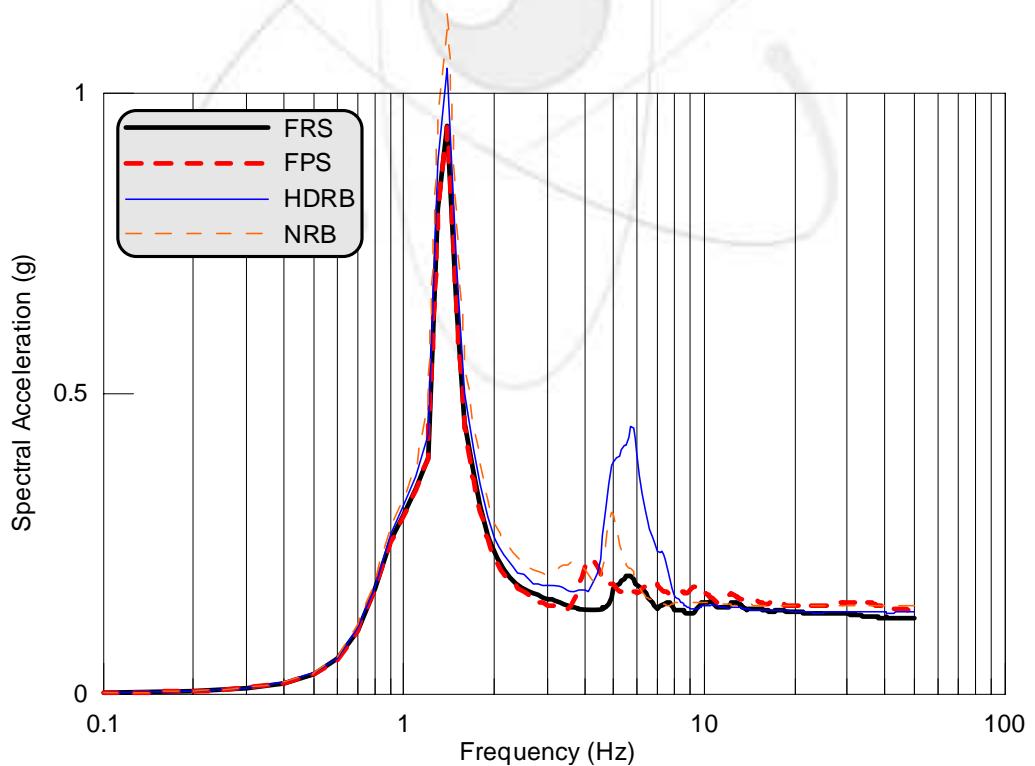
C.13 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.05g)



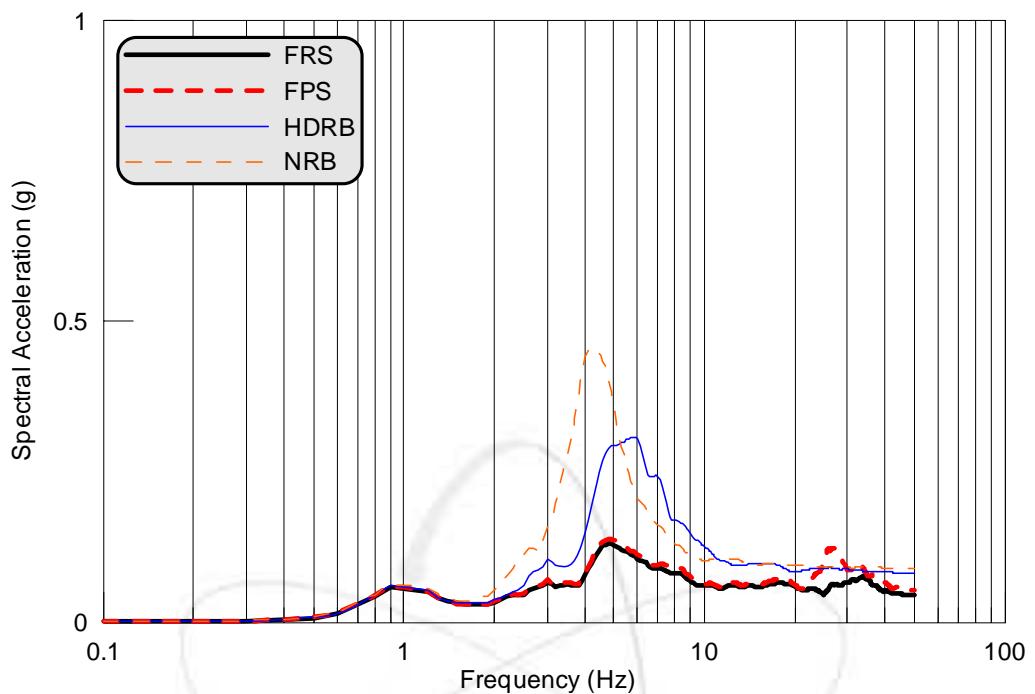
C.14 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.05g)



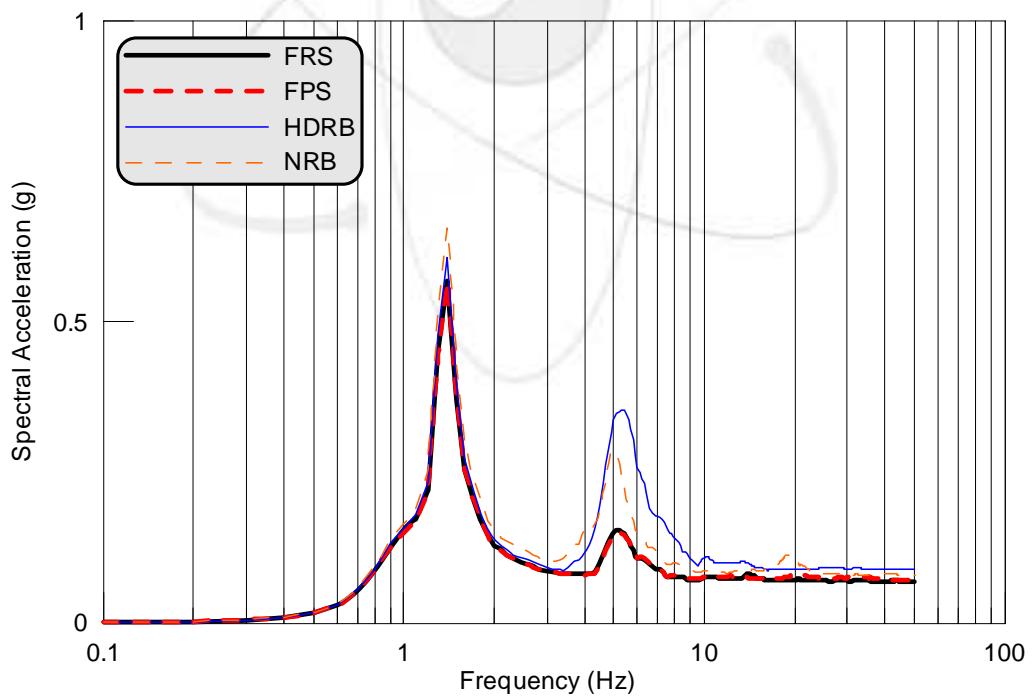
C.15 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)



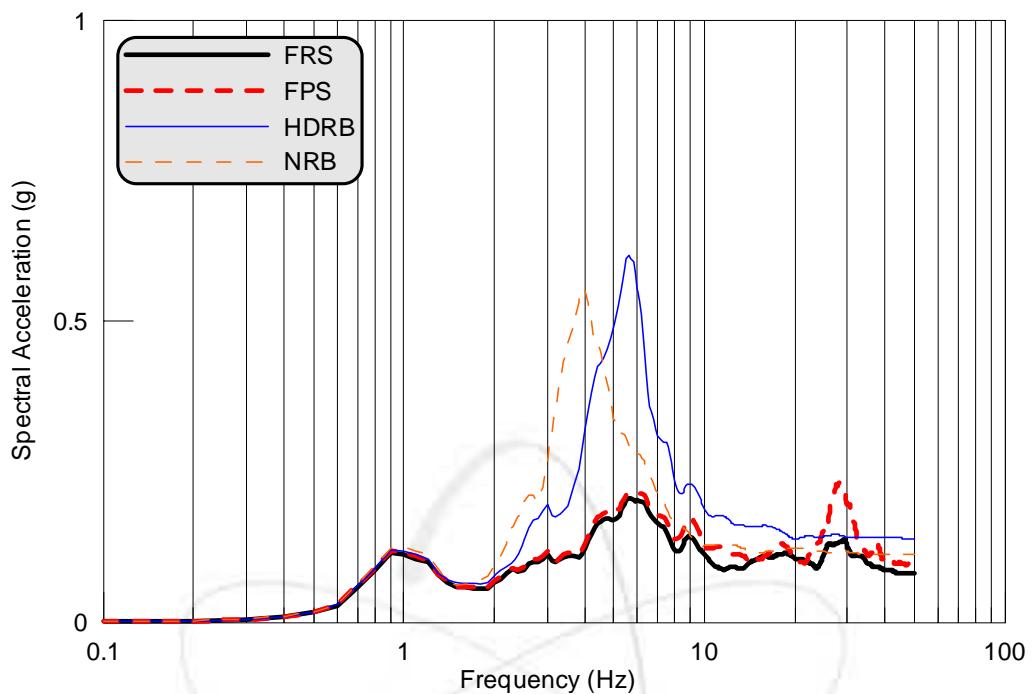
C.16 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 1D, 0.1g)



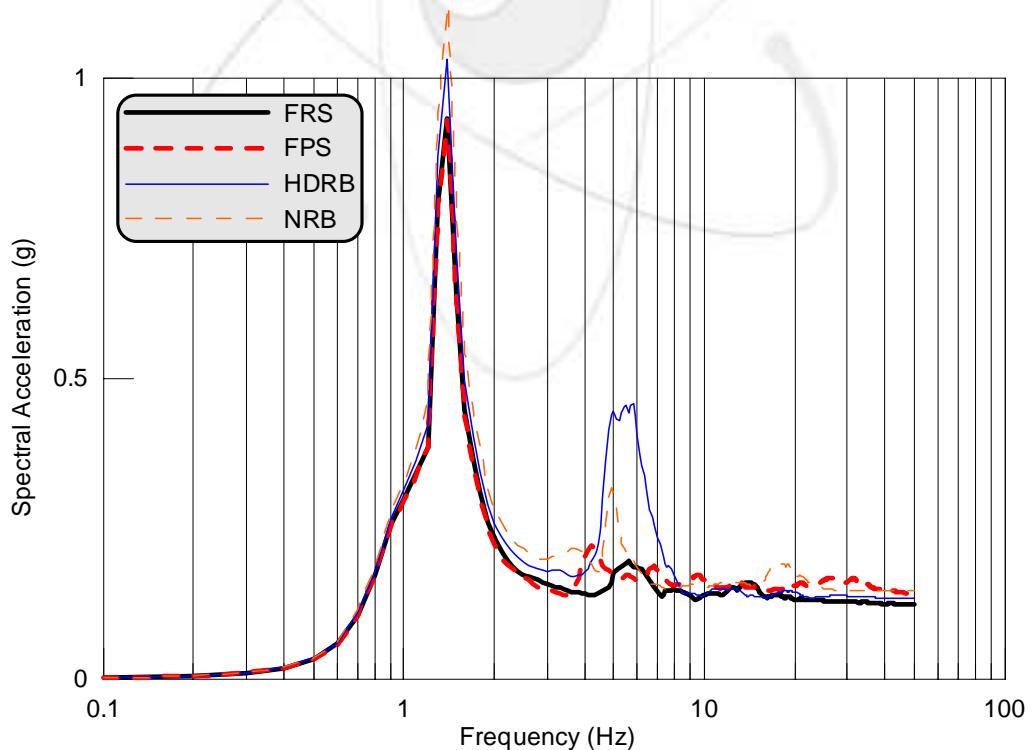
C.17 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.05g)



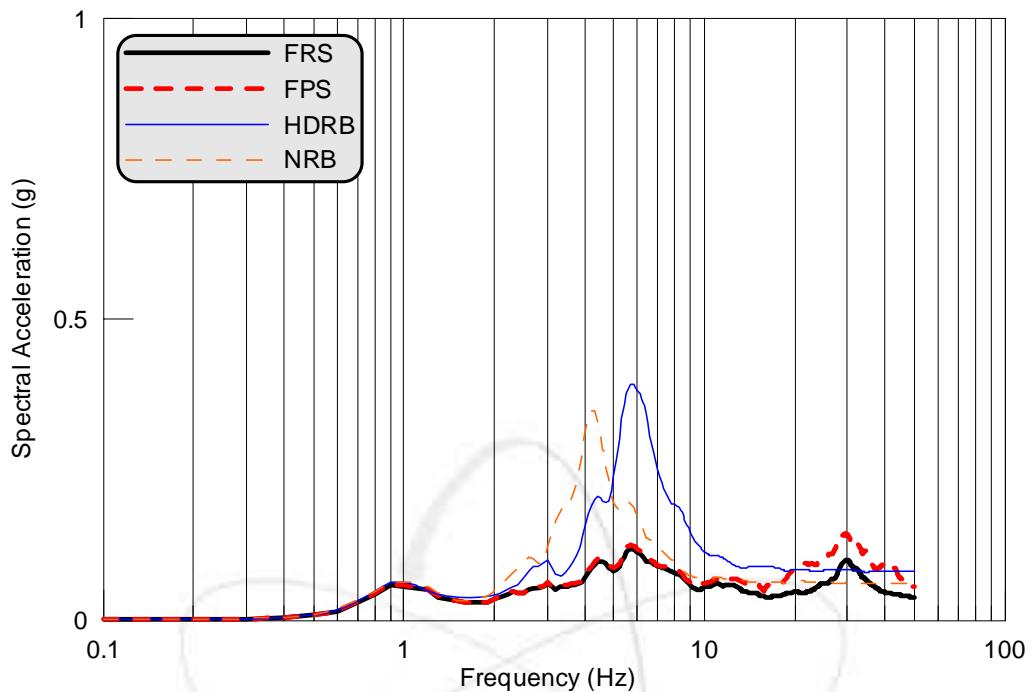
C.18 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.05g)



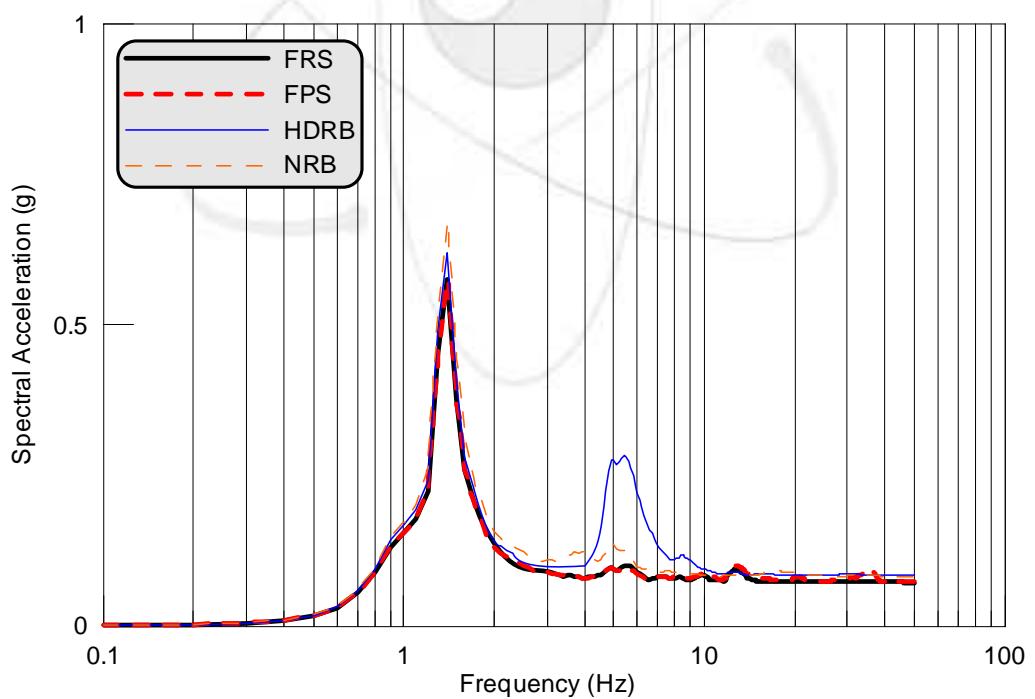
C.19 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.1g)



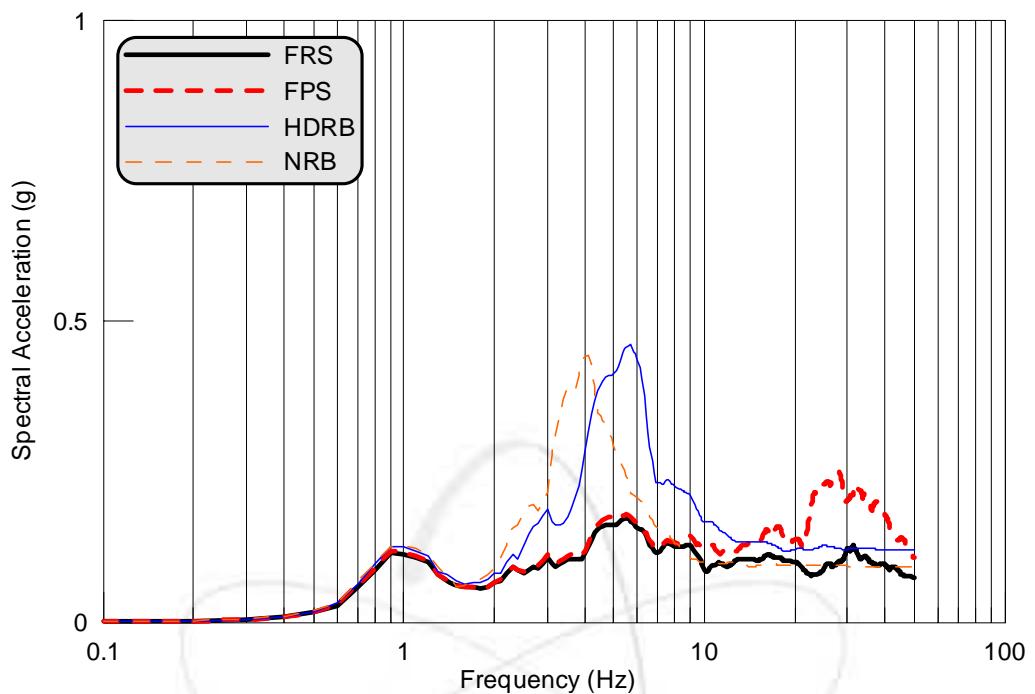
C.20 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 2D, 0.1g)



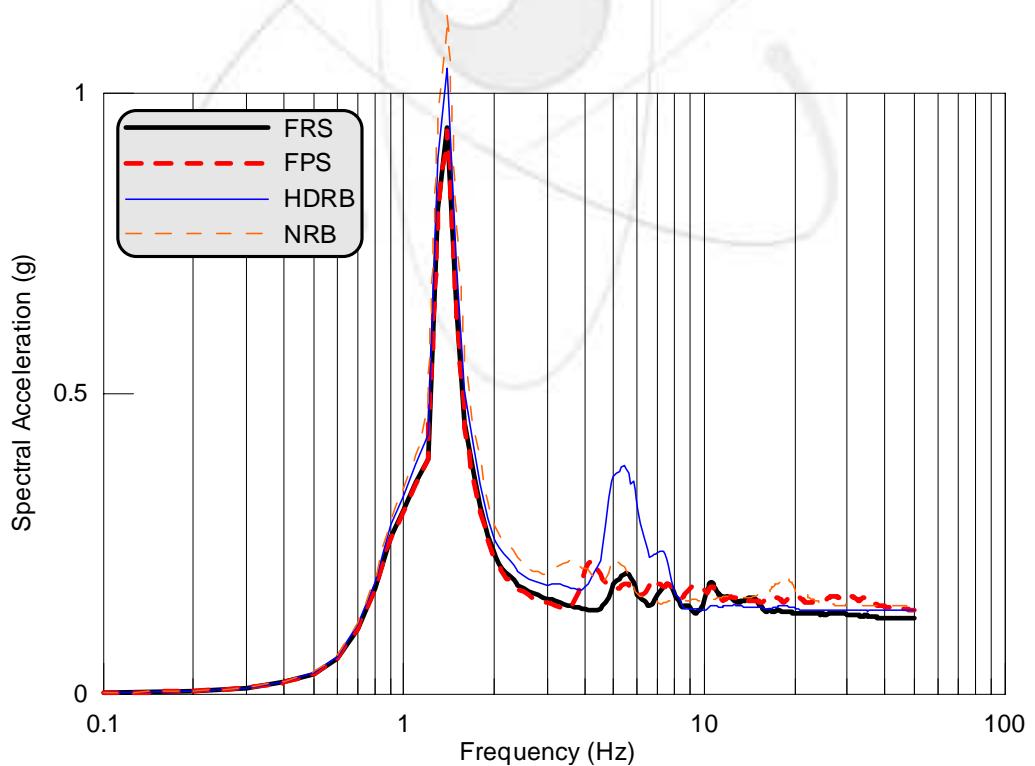
C.21 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.05g)



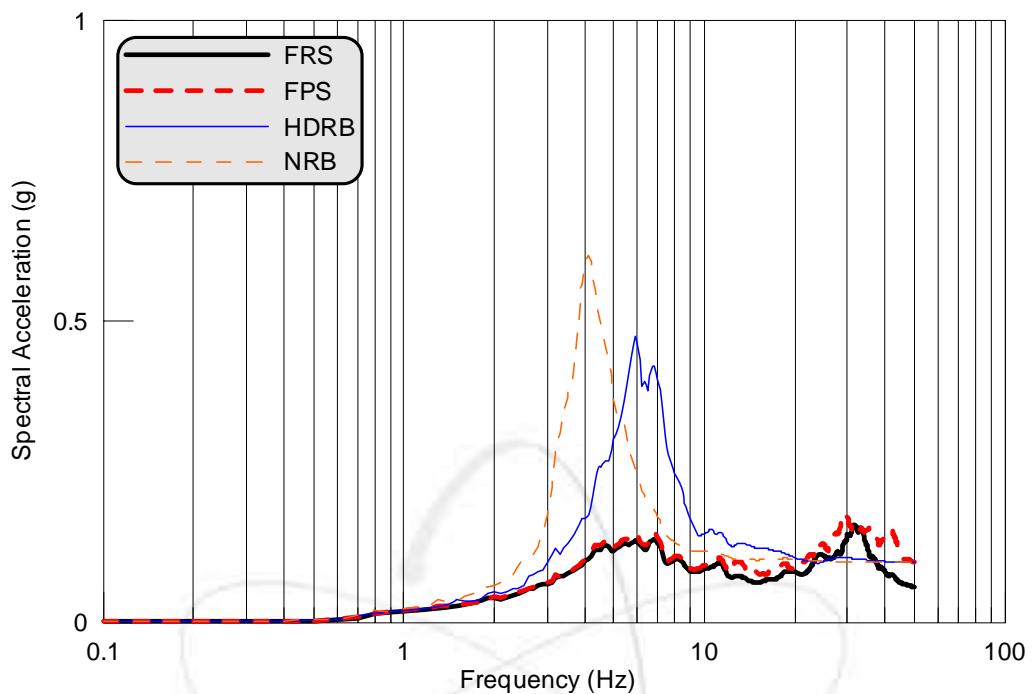
C.22 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.05g)



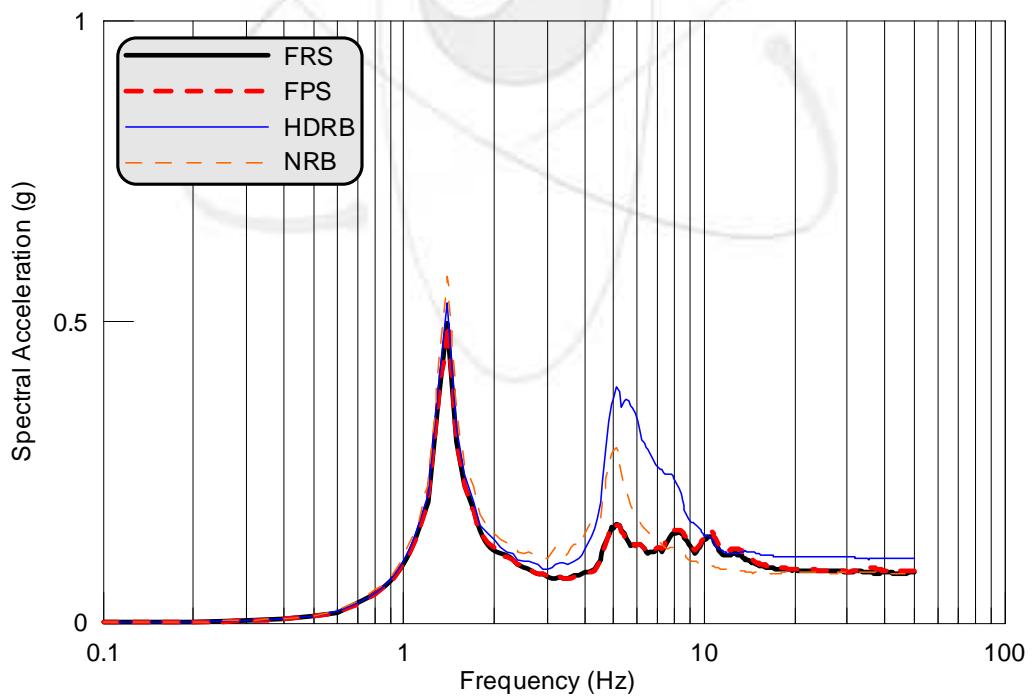
C.23 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)



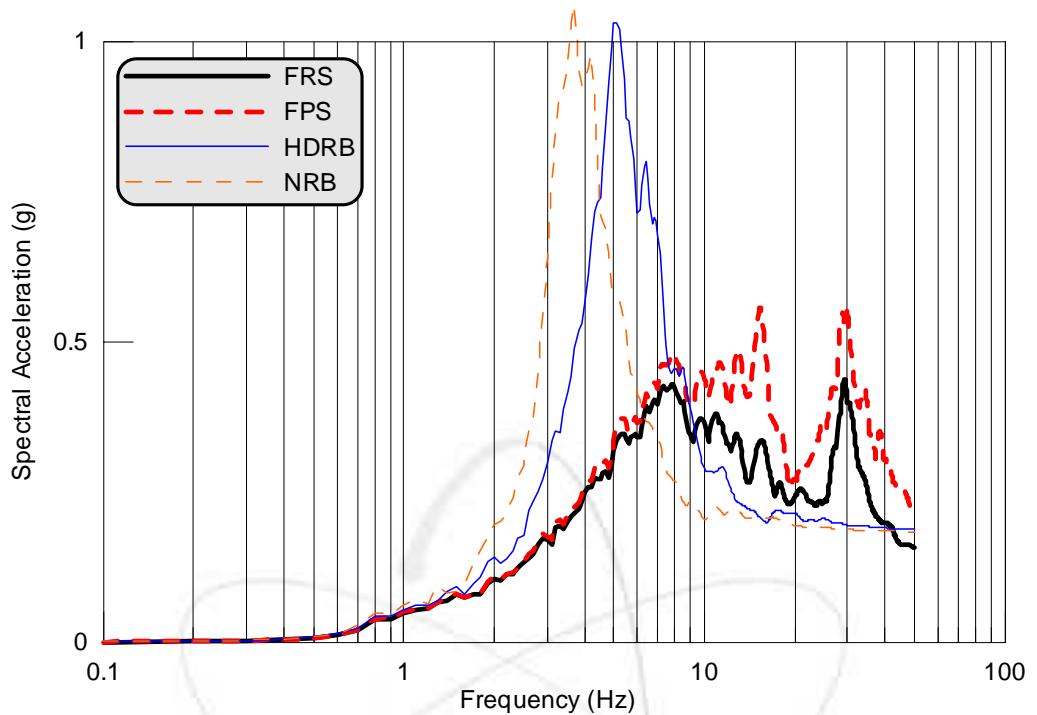
C.24 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (TCU052지진, 3D, 0.1g)



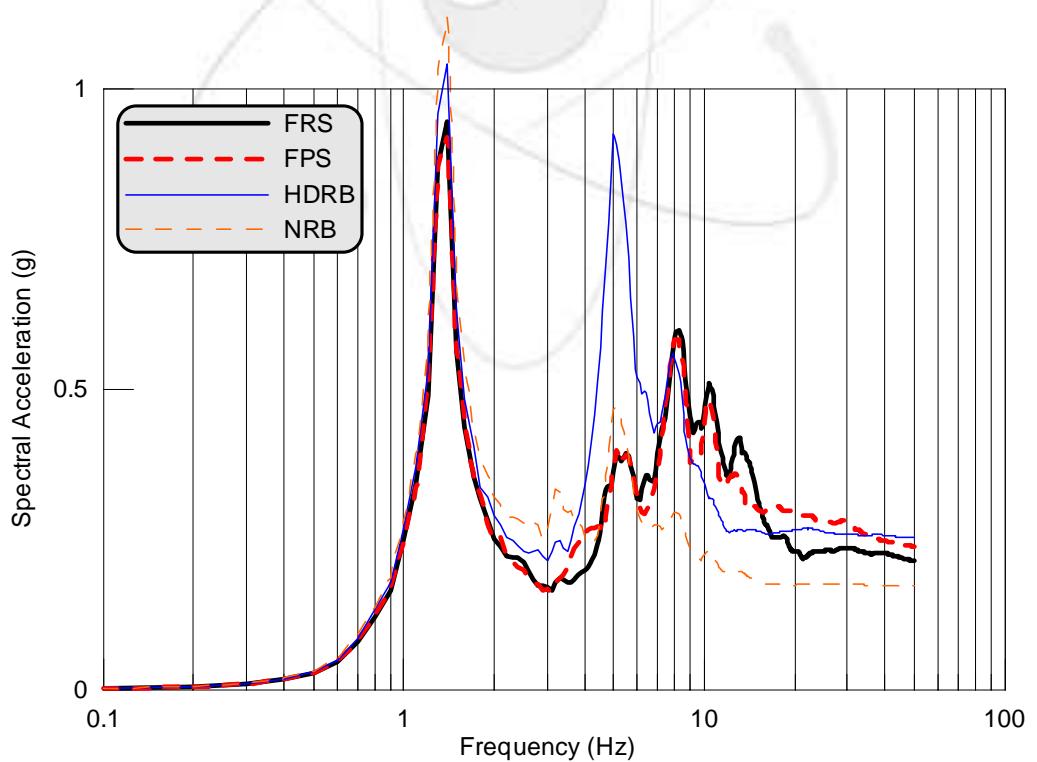
C.25 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.05g)



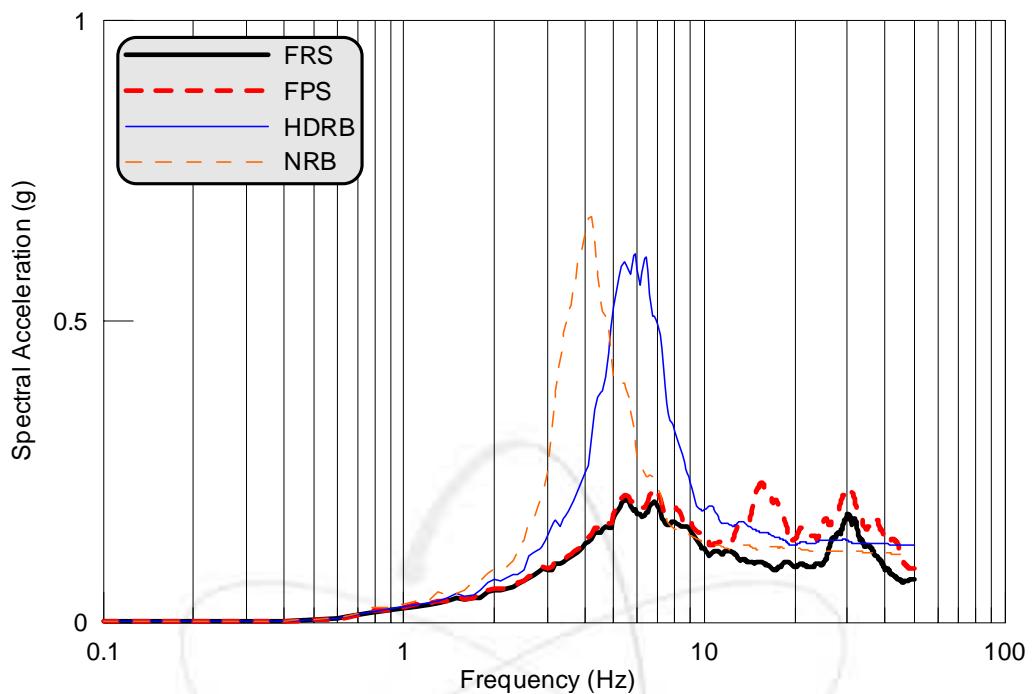
C.26 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.05g)



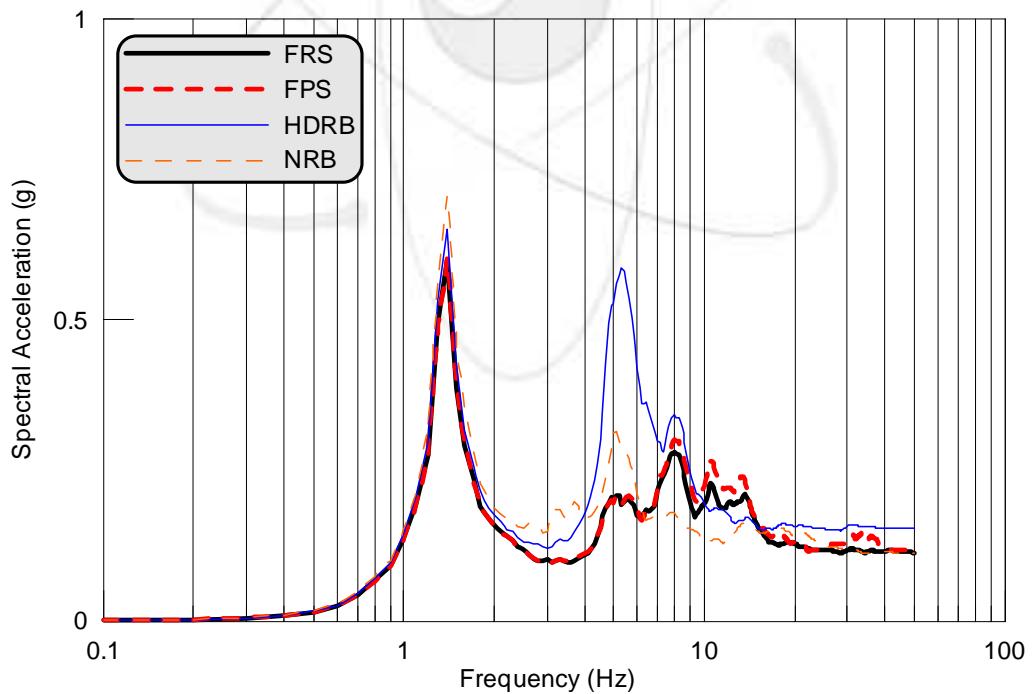
C.27 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)



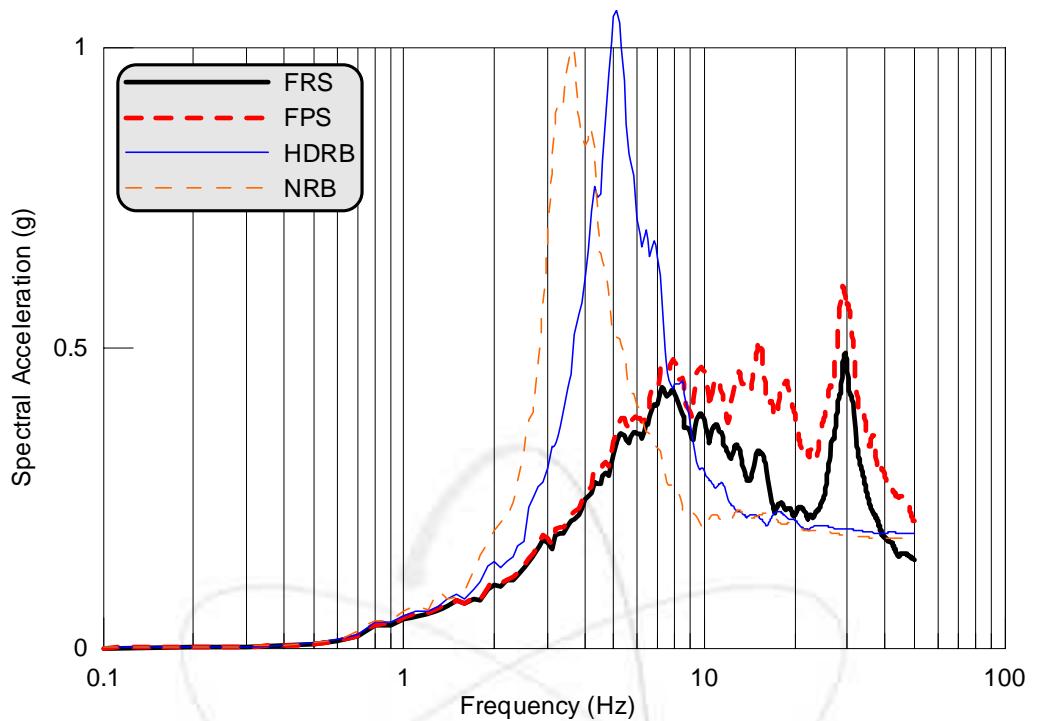
C.28 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 1D, 0.1g)



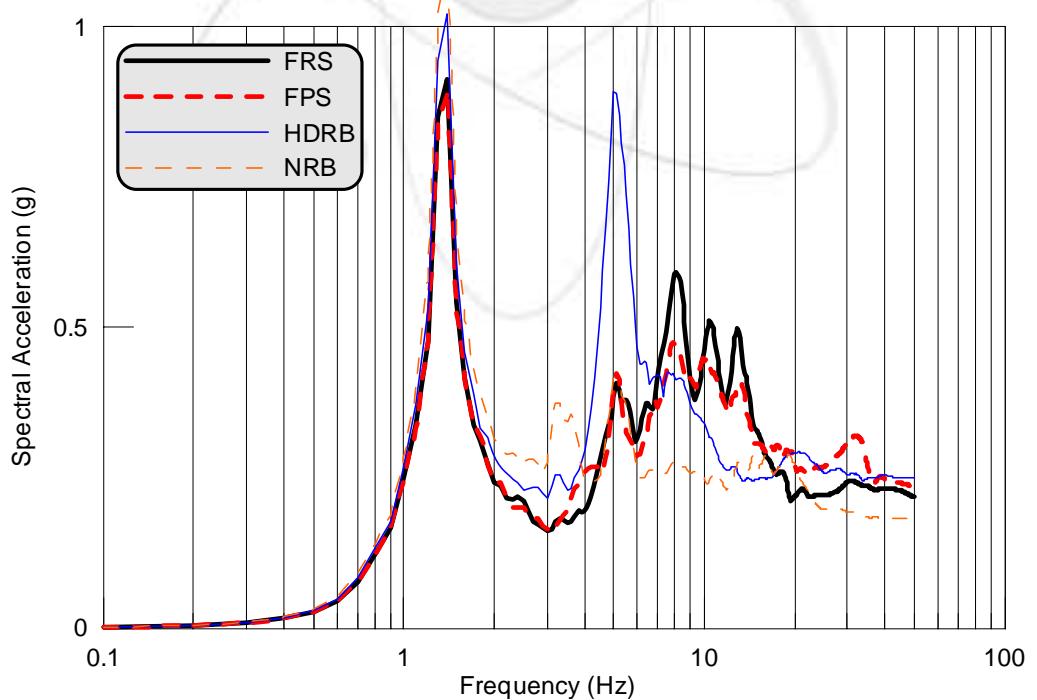
C.29 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.05g)



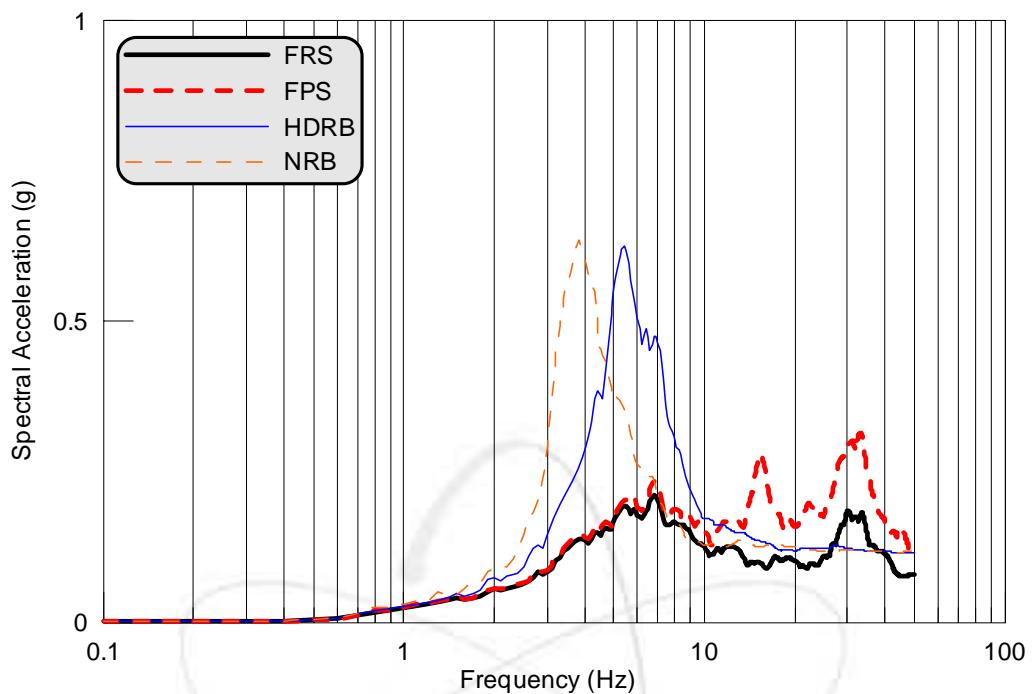
C.30 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.05g)



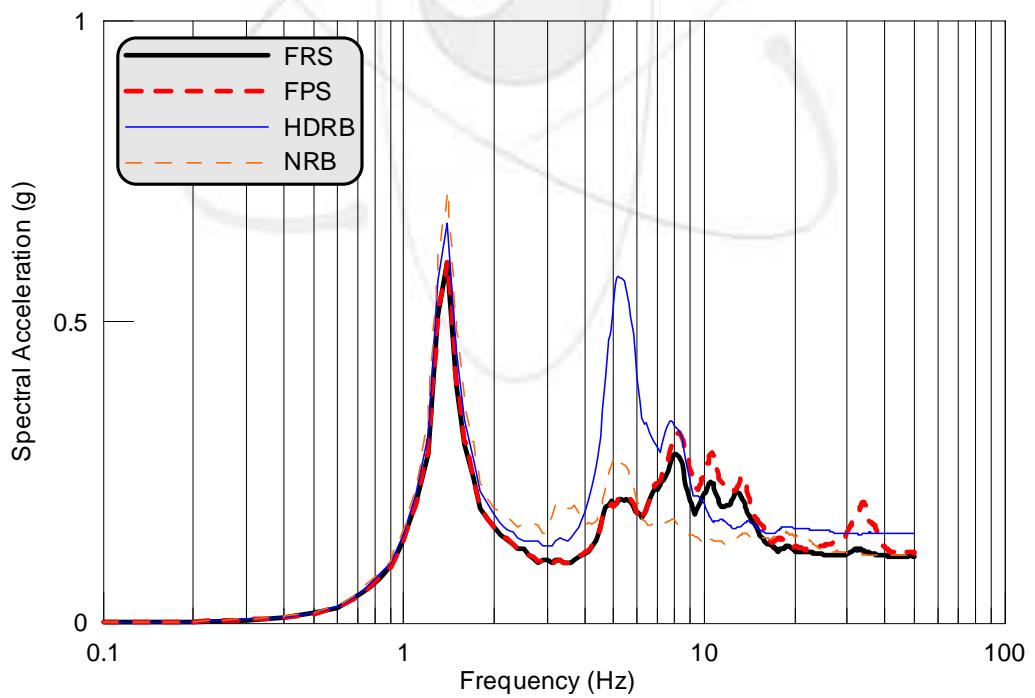
C.31 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.1g)



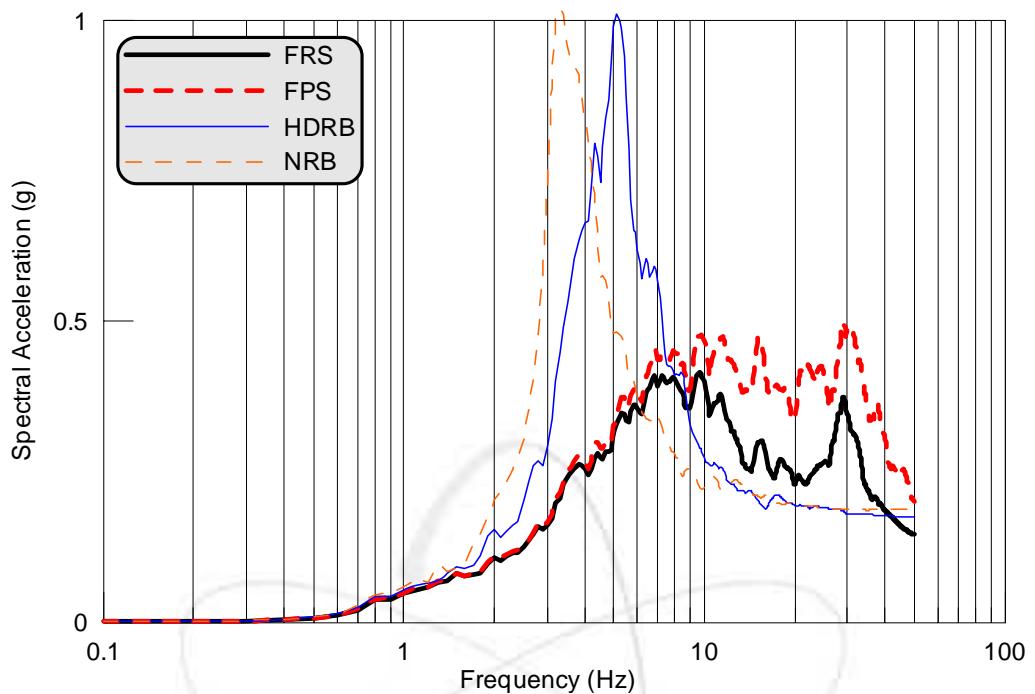
C.32 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 2D, 0.1g)



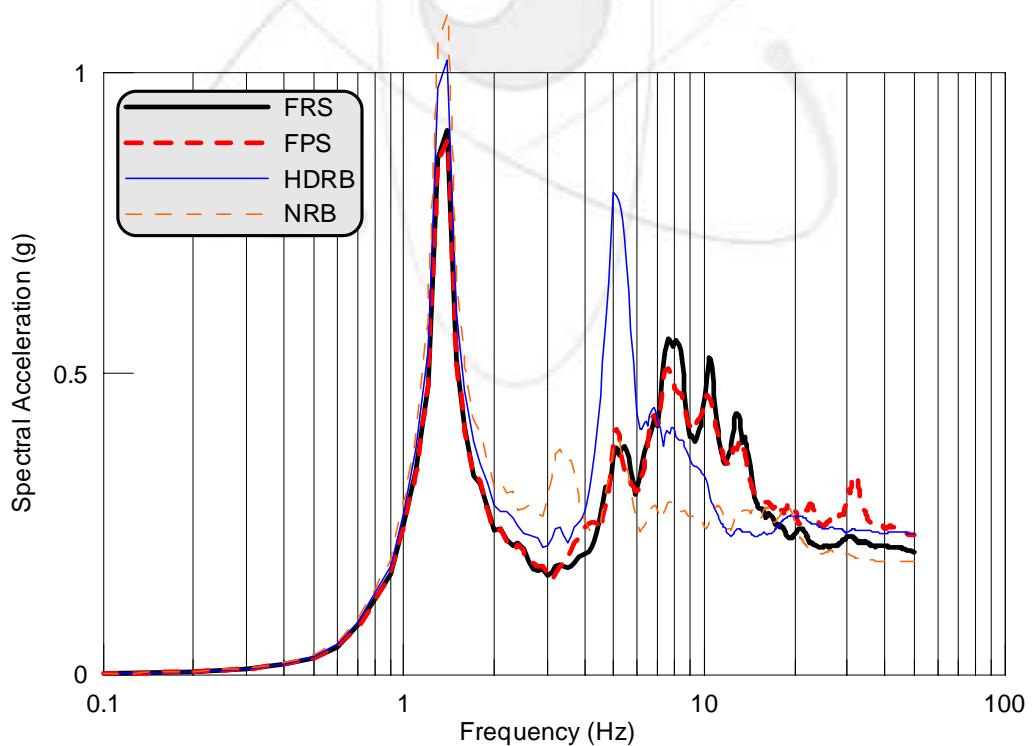
C.33 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.05g)



C.34 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.05g)



C.35 6층 구조물 1층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)



C.36 6층 구조물 5층기기 응답스펙트럼 (NRC지진, 3D, 0.1g)

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호		표준보고서번호	INIS 주제코드			
KAERI/TR-2765/2004							
제목 / 부제	면진장치를 이용한 원전 기기의 내진성능 분석 관한 연구						
연구책임자 및 부서명 (AR,TR등의 경우 주저자)	김민규 (신형원자로개발단 종합안전평가부)						
연 구 자 및 부 서 명	전영선, 최인길 (종합안전평가부) 서정문 (신형원자로 개발단)						
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004		
폐 이 지	159 p.	도 표	있음( O ), 없음( )	크 기	210x297mm.		
참고사항							
비밀여부	공개(O), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류	기술보고서			
연구위탁기관				계약 번호			
초록 (15-20줄내외)							
<p>본 연구에서는 원전기기의 내진안정성 향상기법의 개발을 위한 진동대 실험을 수행하였다. 진동수 특성이 상이한 3종류의 구조물의 대상으로 실험을 하였으며, 진동대 실험을 위한 지진파로는 US NRC Reg. Guide 1.60에서 제시하고 있는 원전을 위한 설계응답스펙트럼을 준용한 인공지진과 국내 원전부지의 부지응답평가를 통하여 개발한 스펙트럼을 이용한 Scenario 지진 그리고 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 TCU052 site에서 계측된 지진파를 사용하였다. 면진기기를 나타내기 위하여 400Kg의 강체를 사용하였으며, 면진장치로는 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무베어링(HDRB) 그리고 마찰진자형 베어링(FPS)를 선택하여 사용하였다. 따라서 주파수 특성이 다른 구조물과 지진파를 사용하였을 경우 각 면진장치에 따른 기기면진 효과를 알 수 있도록 하였다. 실험결과 조건에 맞는 면진장치의 설계가 이루어진다면 면진장치를 이용한 기기면진이 가능함을 알 수 있었다.</p>							
주제명키워드 (10단어내외)	진동대 실험, 천연고무베어링, 고감쇠고무베어링, 마찰진자형베어링, 기기면진						

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET									
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code						
KAERI/TR-2765/2004									
Title / Subtitle	A Study of Seismic Capacity of Nuclear Equipment with Seismic Isolation System								
Project Manager and Department (or Main Author)	Min-Kyu Kim (Integrated Safety Assessment Division)								
Researcher and Department	Young-Sun Choun, In-Kil Choi (Integrated Safety Assessment Division) Jeong-Moon Seo (Advanced Nuclear Technology Development)								
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2004				
Page	159 p.	Ill. & Tab.	Yes( <input checked="" type="checkbox"/> ), No ( <input type="checkbox"/> )	Size	210x297m m.				
Note									
Classified	Open( <input checked="" type="checkbox"/> ), Restricted( <input type="checkbox"/> ), ____ Class Document		Report Type	Technical Report					
Sponsoring Org.			Contract No.						
Abstract(15-20 Lines)									
In this study, the base isolation systems for equipment are presented and the responses of each isolation system are investigated. As for the base isolation systems, a natural rubber bearing (NRB), a high damping rubber bearing (HDRB) and a friction pendulum system (FPS) are selected. The shaking table tests are carried out for three kinds of structural types. As input motions, artificial time histories enveloping the US NRC RG 1.60 spectrum and the probability-based scenario earthquake spectra developed for the Korean nuclear power plant site as well as a typical near-fault earthquake record are used. Uniaxial, biaxial, and triaxial excitations are conducted with PGAs of 0.05, 0.1, 0.2 and 0.25g. Acceleration responses are measured at the top of the equipment model and the floors using an accelerometer. The reduction of the seismic forces transmitted to the equipment models are determined for different isolation systems and input motions.									
Subject Keywords (About 10 words)	Shaking Table Test, Natural Rubber Bearing, High Damping Rubber Bearing, Friction Pendulum System, Equipment Isolation								