

# 충응답을 고려한 소형면진장치의 진동대실험

## A Shaking Table Test of Small Isolation System Considering the Floor Response

김민규\*                      전영선\*\*                      이경진\*\*\*  
Kim, Min Kyu              Choun, Young Sun              Lee, Kyung Jin

### ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies on the equipment isolation effect considering the floor response. For this purpose, shaking table tests were performed. For the measuring the floor response, numerical analysis was performed. For the isolation for the equipment, Natural Rubber Bearing(NRB), High Damping Rubber Bearing(HDRB) and Friction Pendulum System(FPS) were used. Finally, it is presented that the isolation systems used in this test can be adopted for the small equipment isolation. But the rubber bearing used in this study affected to the temperature change very sensitively.

**Key word** : equipment isolation, floor response, shaking table test, Natural Rubber Bearing(NRB), High Damping Rubber Bearing(HDRB), Friction Pendulum System (FPS), temperature change

### 1. 서 론

2004년에는 국내적으로는 울진 앞바다에서 규모 5.2의 지진이 발생하였고, 국외적으로는 일본의 니가타 지진과 동남아시아에서 발생한 규모 8.9의 해일을 동반한 지진으로 인하여 지진에 대한 관심이 매우 높았던 한해라고 할 수 있다. 특히 울진 앞바다에서 발생한 지진은 울진 원전과 근접한 거리에서 발생한 지진으로서 원전의 지진에 대한 안전성이 더욱 크게 중요하게 부각되었다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 널리 수행되고 있는 구조물에 대한 면진에 반하여 저중량 소규모 기기의 면진을 통하여 전체 원전의 안전성을 향상시키고자 하는 노력으로 기기면진을 위한 진동대 실험을 수행하였다. 기기면진이 구조물의 면진과 다른점은 대부분의 기기는 구조물에 비하여 상대적으로 중량이 작으므로 인하여 구조물의 면진에 사용하는 면진장치로는 면진효과를 발휘하기가 쉽지 않은 점에 있다. 또한 기기는 일반적으로 고정되었을 경우 그 고유진동수가 15Hz 이상이므로 면진되었을 경우 강체와 같은 거동을 보일 수 있다는 점이다. 이러한 특성을 반영하기 위하여 소형기기의 면진에 사용할 수 있는 3종류의 면진장치를 개발하여 설계 제작하였으며 주파수

\* 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사, 정회원  
\*\* 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사, 정회원  
\*\*\* 전력연구원 구조연구실 내진기술그룹 선임연구원, 정회원

특성을 달리한 대표적인 지진파를 선정하여 진동대 실험을 함으로서 면진장치와 주파수 특성에 따른 기기면진효과를 분석하였다. 특별히 구조물 내부에 존재하는 면진기기의 지진응답을 분석하기 위하여 원전내 존재 가능한 구조물을 선정하여 해당 구조물에서의 총응답을 관측하여 관측된 총응답을 진동대의 입력으로 사용하여 실험을 수행하였다. 실험결과 대상으로 한 400Kg중량의 기기의 경우 일반적인 면진장치를 이용하여 면진시키고자 할 때 많은 노력이 필요함을 알 수 있었고 지진파의 특성에 따라 면진효과의 차이가 크게 발생함으로 해당부지의 발생가능한 지진파를 선정하는 것이 면진장치의 선정에 중요한 요소임을 알 수 있었다. 또한 고무베어링의 경우 장시간 방치하였을 경우 또 온도차이가 심하게 발생할 경우 강성의 변화가 발생하며 이러한 강성의 변화가 고유진동수의 변화를 초래하는 것을 알 수 있었다.

## 2. 연구배경

기존의 김민규 등(2004b, 2004c)의 연구에서는 월성원전 격납건물을 대상으로 하여 격납건물의 고유진동수와 유사한 형태의 4층 철골 구조물을 제작하여 구조물 내부의 기기면진을 목표로 한 진동대 실험을 수행한 바가 있다. 그러나 그때의 실험에서 대상으로 제작하였던 4층 철골구조물의 경우 총 무게가 약 7ton인데 반해 구조물의 중간에 설치된 3개의 모형기기의 무게가 각각 400kg 이므로 3개의 무게가 1.2ton이므로 전체 구조물에서 면진기기가 차지하는 무게가 너무 큼에 따라서 구조물과 면진기기가 상호작용하는 결과를 초래함으로 실제 구조물에서의 총응답이 나타나지 않는 결과를 초래하였다. 그림 1과 그림 2에서는 NRC의 설계지진을 PGA 0.2g 로 가진한 경우 진동대에서의 입력과 기기가 위치한 3층에서의 가속도 응답을 제시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 진동대에서는 거의 유사하게 지진파가 입사가 되었음에도 동일층에서의 응답이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 여기서의 차이는 총응답의 가속도 수준뿐 아니라 주파수 특성도 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 기기가 포함된 구조물에서의 총 응답은 고주파 성분이 많이 존재하며 응답이 크게 증폭되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 구조물 내부의 면진된 기기가 mass damper와 같은 역할을 함으로서 구조물에서의 응답을 감소시켰음을 알 수 있다. 반면 구조물만을 대상으로 실험을 한 경우는 구조물 자체의 고유진동수가 반영되어 균일한 주파수 특성을 보이는 것을 알 수 있으며, 응답이 큰 폭으로 증가하였고 진동대의 진동이 정지한 후에도 자유진동하는 모습을 볼 수 있다. 이와 같이 구조물에서의 응답이 면진기기에 의하여 크게 영향을 받기 때문에 기존의 연구결과가 총응답이 올바르게 반영된 실험이라고 하기가 힘든 결과를 얻게 되었다.

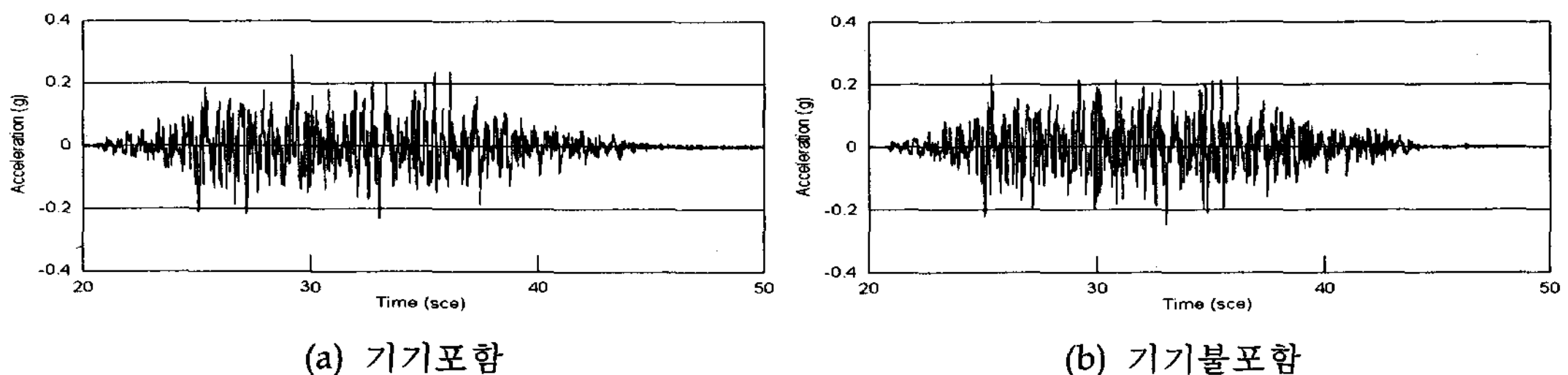
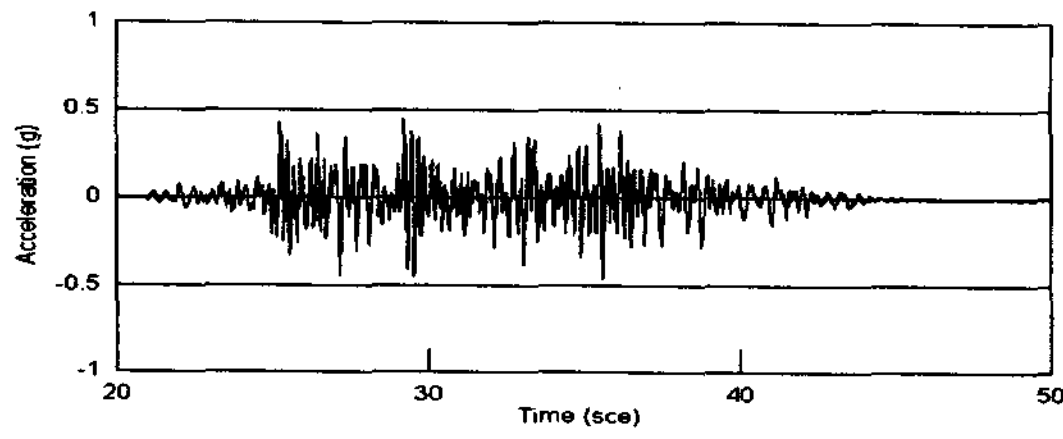
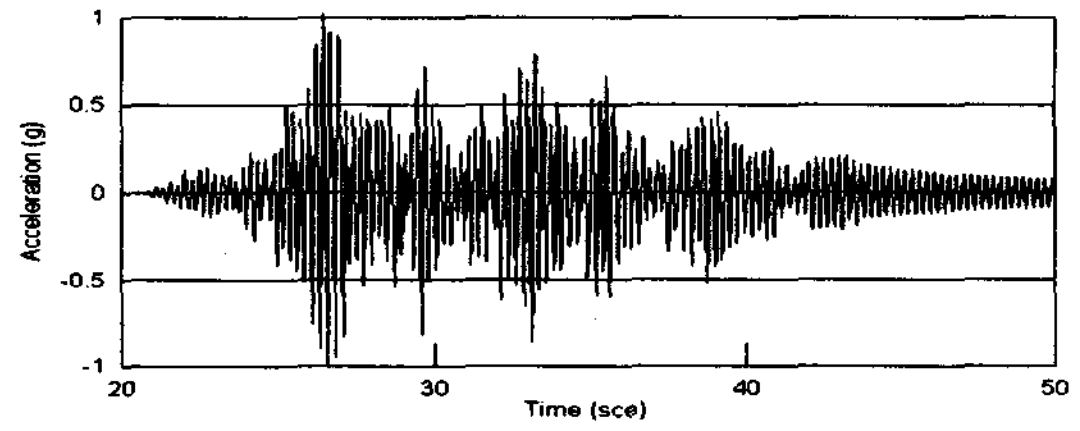


그림 1. 진동대 실험시 입력지진



(a) 기기포함



(b) 기기불포함

그림 2. 기기여부에 따른 동일층에서의 가속도 응답

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 사용하였던 기기와 면진장치 및 지진파를 그대로 이용하여 수치해석에 의한 층응답을 산정하여 면진기기에 의해서 영향받지 않는 경우의 지진입력을 이용한 진동대 실험을 수행하였다.

### 3. 실험의 개요

본 연구에서는 기존의 연구에서 제작한 면진장치와 강체를 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 기존의 실험에서는 월성원전의 격납건물을 목표로 하여 고유진동수 4Hz의 강재 뼈대 구조물을 그림 3과 같이 제작하여 실험을 수행하였으나, 2장에서 제시하였던 것과 같은 문제가 발생하여 면진기기가 설치되어 있지 않은 그림 4와 같은 해석모델을 구성하여 대상구조물에 대한 수치해석을 수행함으로써 대상구조물 4층에서의 층응답가속도 시간이력을 측정하였다. 따라서 기존의 연구에서 선정된 3종류의 입력지진과 각 지진파를 이용하여 대상구조물에 대한 지진응답해석을 수행하여 얻은 층응답가속도 시간이력 3종류, 즉 6종류의 지진기록을 이용한 실험을 수행하였다(그림 6). 면진장치로는 그림 5에서 제시한 것과 같이 기존의 연구에서 사용한 동일한 면진장치를 사용하였다. 진동대 실험은 입력지진의 PGA를 0.1g로 조정하여 수행하였으며, 각 지진파에 대하여 1축방향의 실험을 먼저 수행하고 수평 직교방향의 2방향 실험을 수행하였으며, 마지막으로 지진파의 연직성분을 포함하고 있는 3방향의 실험을 수행하였다. 진동대 실험에는 한전 전력연구원 구조실험동의 6자유도 진동대를 이용하였다.



그림 3. 기존의 실험용 구조물

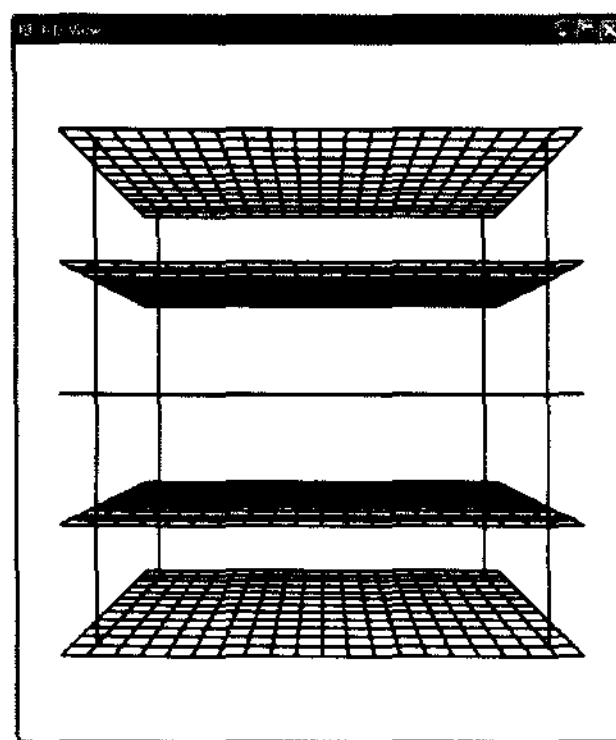
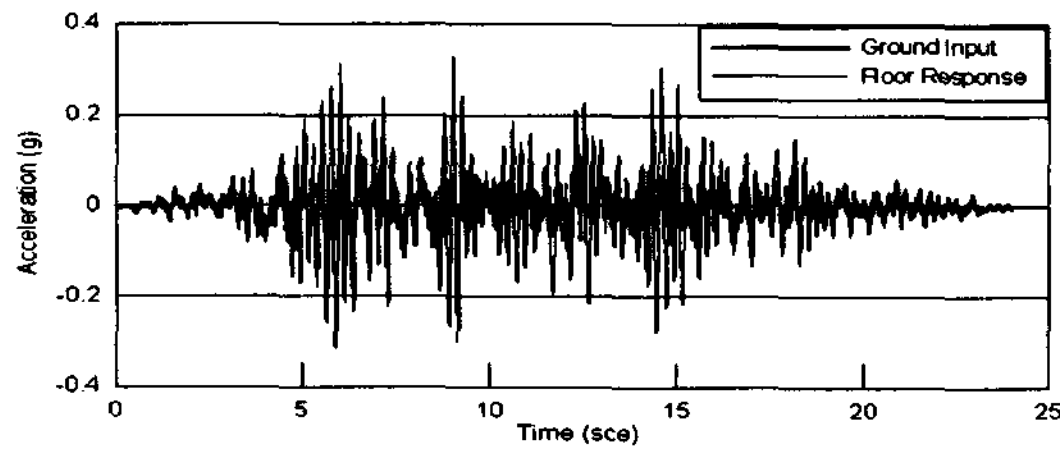


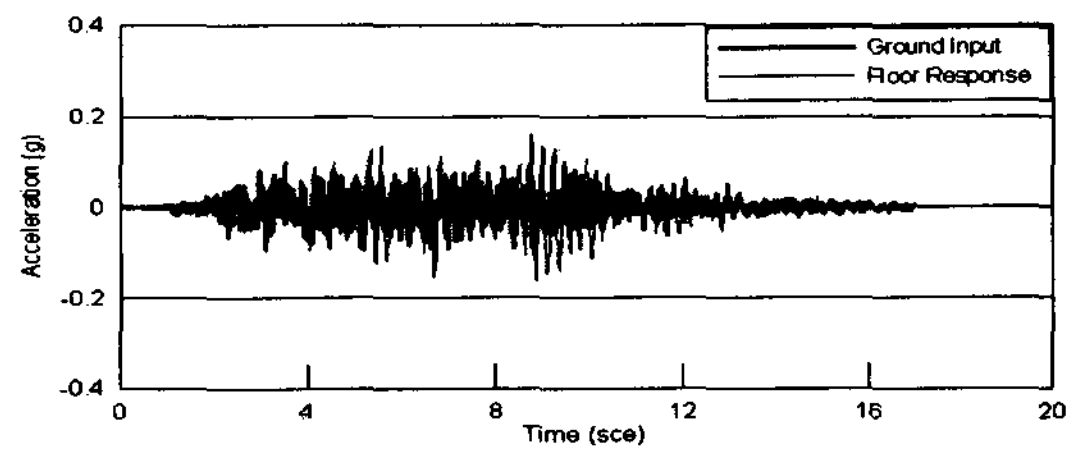
그림 4. 해석모형



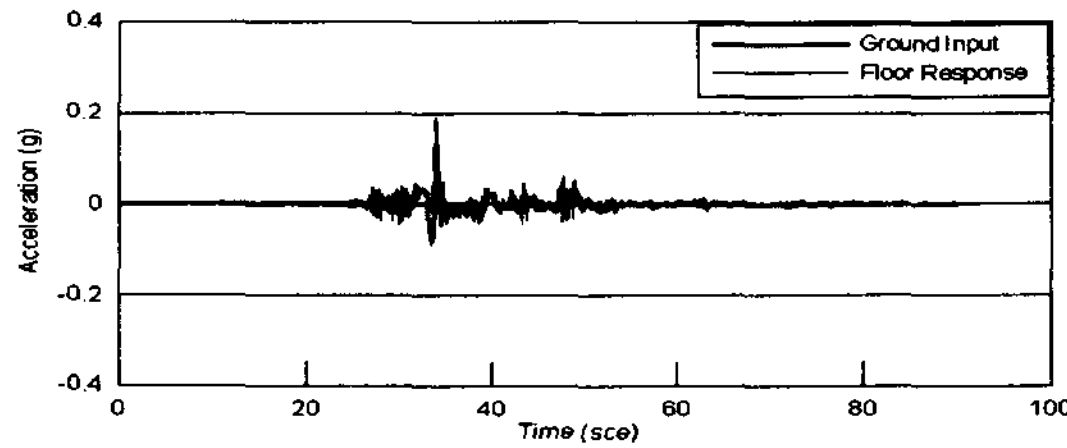
그림 5. 면진장치



(a) NRC 설계지진



(b) Scenario 지진



(c) Chi-Chi 지진 (TCU052)

그림 6. 입력지진 가속도 시간이력

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 층응답에 따른 응답의 변화

입력지진으로 선정된 입력지진동을 이용하여 진동대 실험을 수행하였다. 실험에 의한 결과를 기존의 실험에 의한 결과와 비교하여 보았다. 기존의 실험결과는 김민규 등(2004b, 2004c)의 연구에서 제시한 바와 같이 4층 철골구조물의 바닥면과 4층에 면진된 모형기기를 설치하여 면진효과를 검토한 것이다. NRC의 설계지진을 이용한 경우 1층 기기에서의 가속도 응답스펙트럼을 그림 7에 도시하였고, 4층 기기에서의 가속도 응답스펙트럼을 그림 8에 도시하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 1층기기의 경우는 실험의 결과가 큰 차이를 보이지 않고 있는 것을 알 수 있다. 다만 기존의 연구에서 밝힌 바와 같이 기존의 연구에서는 목표로 하는 지진의 시간이력을 정확하게 모사하지 못한 반면 본 실험에서는 비교적 NRC 설계지진의 응답스펙트럼을 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 특이한 사항은 NRB와 HDRB로 면진한 경우 전체 시스템의 고유진동수가 상당히 변화되었다는 사실이다. 이것은 기존의 실험이 2003년에 수행되었고 동일한 면진장치를 1년 6개월 정도 보관 후 수행되었기 때문에 고무의 특성에 심각한 변화가 발생한 것으로 판단된다. 장기간의 보관에 따른 고무의 경화현상이 발생한 것으로 판단된다. 또한 경화현상보다 더 큰 영향을 미친 요소로는 기존의 실험이 2003년 여름에 수행된 반면 이번의 실험은 2005년 1월에 수행되었으므로 실험당시의 온도차이가 크게 발생함으로 인하여 고무베어링의 특성에 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 실제로 이러한 고유진동수의 차이가 발생하기 위해서는 고유진동수는 면진장치 강성의 제곱승에 비례하므로 강성이 2배정도 증가하여야 하므로 실제로 발생하기는 쉽지 않은 현상이며 발생해서도 안되는 현상인 것으로 판단된다.

그림 8에서는 4층에 설치되어 있는 기기에 대한 응답으로서 기존의 실험결과와 층 응답이 확연하게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 본 실험에서는 기존의 실험에서 명확하게 나타나지 않았던 구조물의 고유진동수인 4.2Hz 가 명확하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 면진장치의 특성

변화에 따른 고유진동수의 변화도 동일하게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 면진장치의 물성이 변화하지 않았다면 좀 더 우수한 면진효과를 발휘할 수 있었을 것으로 판단되지만 고무베어링의 고유진동수가 증가함으로 인하여 면진특성이 잘 발휘되지 않는 것을 알 수 있다.

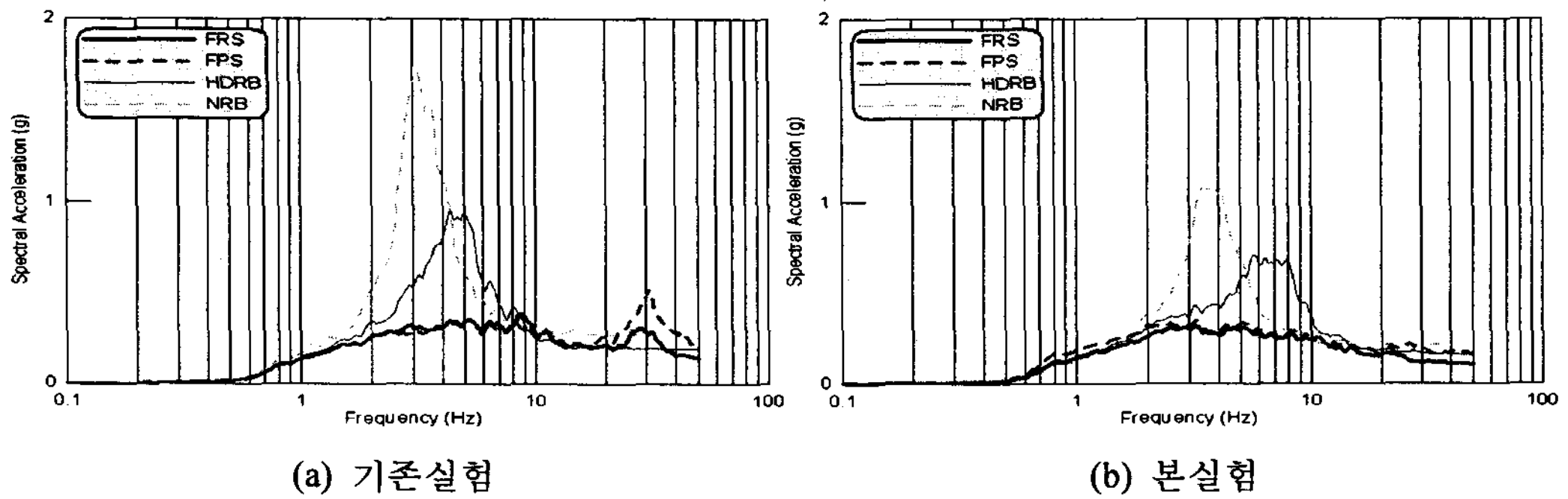


그림 7. NRC 지진에 의한 응답스펙트럼(1층)

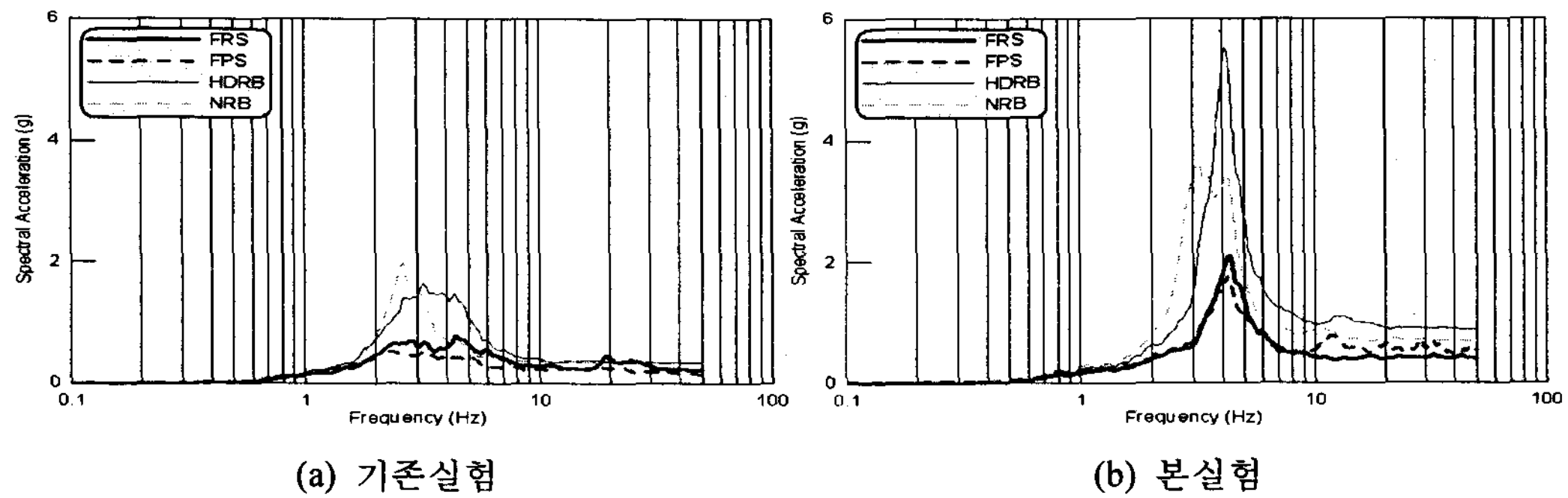


그림 8. NRC 지진에 의한 응답스펙트럼(4층)

Scenario 지진에 의한 면진기기의 응답은 그림 8와 그림 10에 도시하였다. Scenario 지진의 경우에도 NRC 설계지진의 경우와 유사한 응답특성을 보이는 것을 알 수 있다. 면진장치의 특성이 변화된 관계로 면진효과가 잘 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 면진장치의 특성이 변화되지 않았다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있었을 것으로 판단되며 이러한 주변환경에 영향을 덜 받는 FPS의 경우는 거동특성에 변화가 없는 것을 알 수 있다.

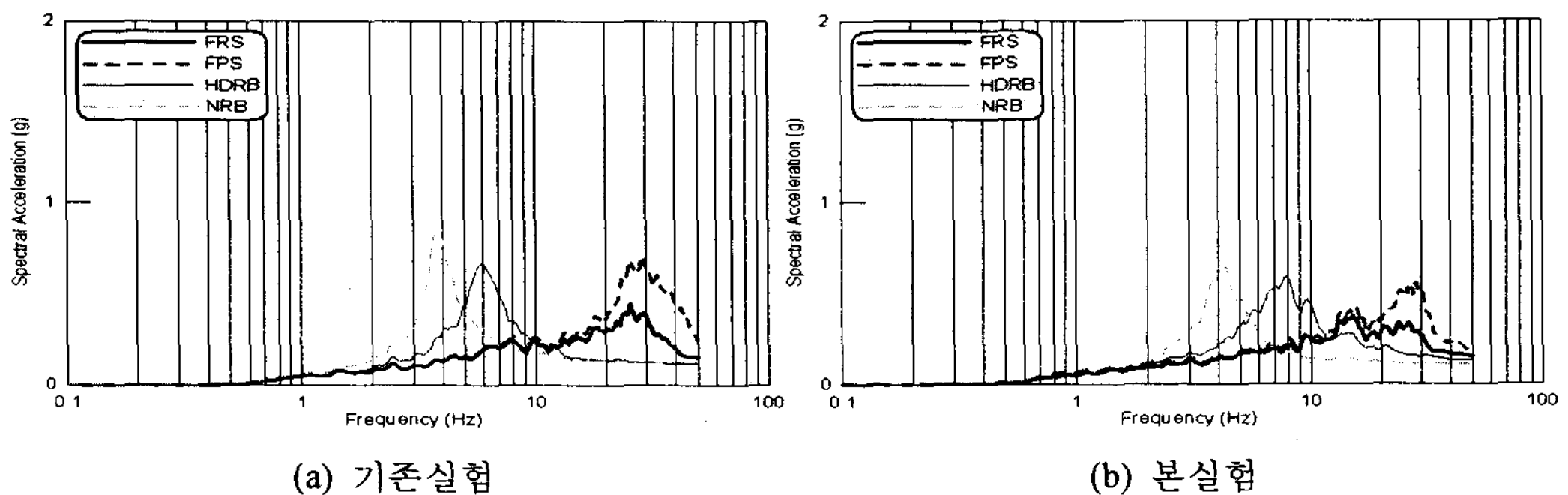


그림 9. SCE 지진에 의한 응답스펙트럼(1층)

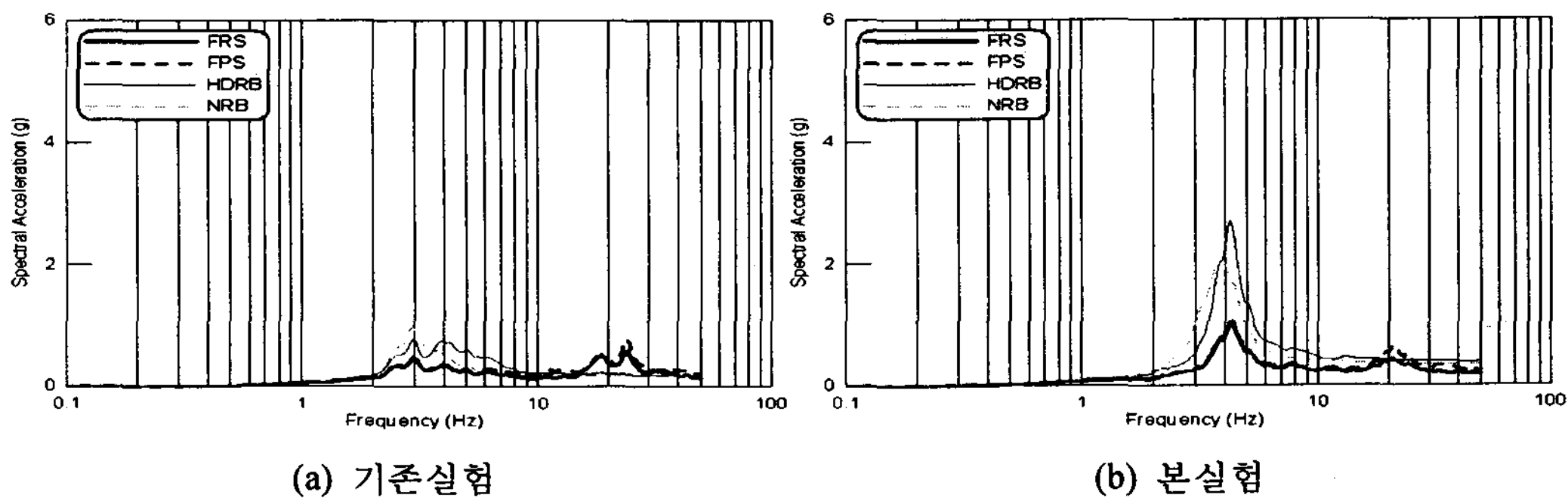


그림 10. SCE 지진에 의한 응답스펙트럼(4층)

오래된 고무의 특성변화와 온도변화에 따른 고무의 특성변화를 살펴보기 위하여 일본면진구조 협회에서 발간한 면진적층고무 입문에서 제시하고 있는 특성변화를 다음의 그림 11과 12에서 살펴 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 방치된 경우에는 그 특성의 변화가 그다지 크지 않지만 온도 변화는 고무의 강성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 고감쇠고무가 일반천연고무에 비하여 온도변화에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

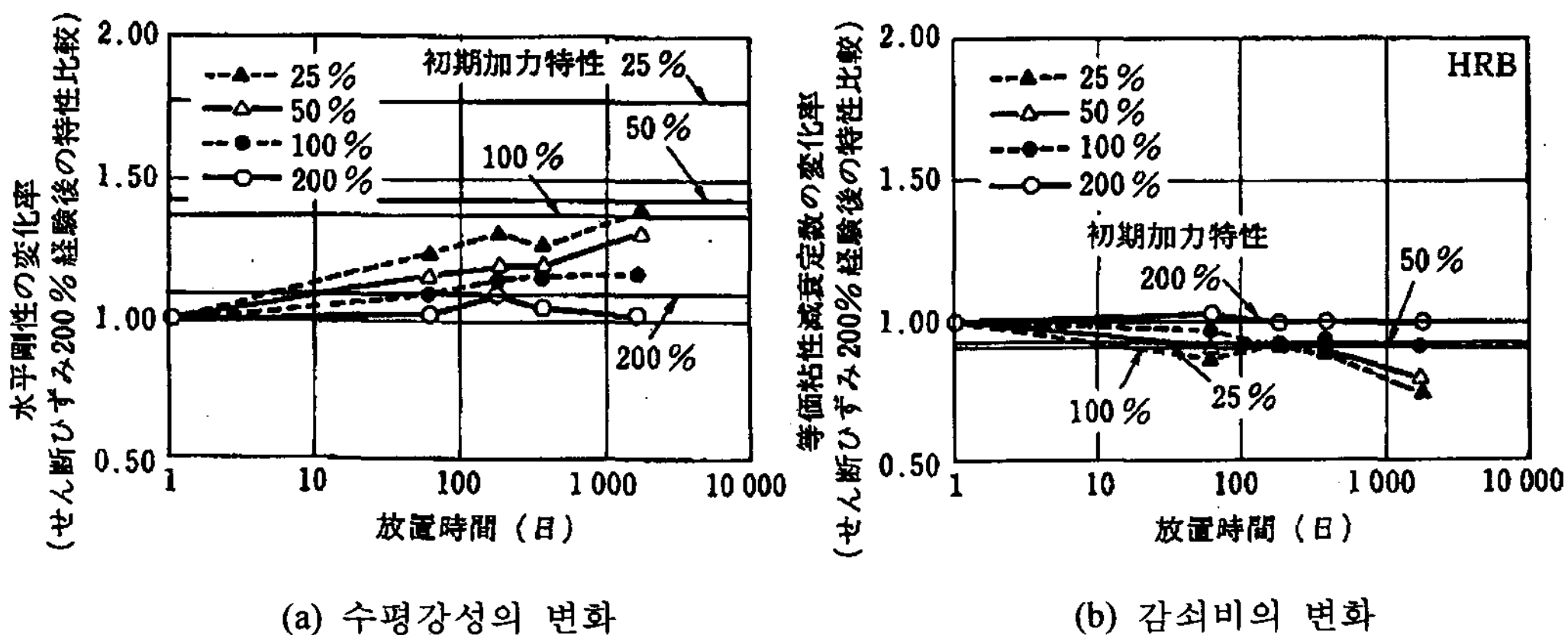


그림 11. 방치시간에 따른 고무의 특성변화 (日本免震構造協會, 1997)

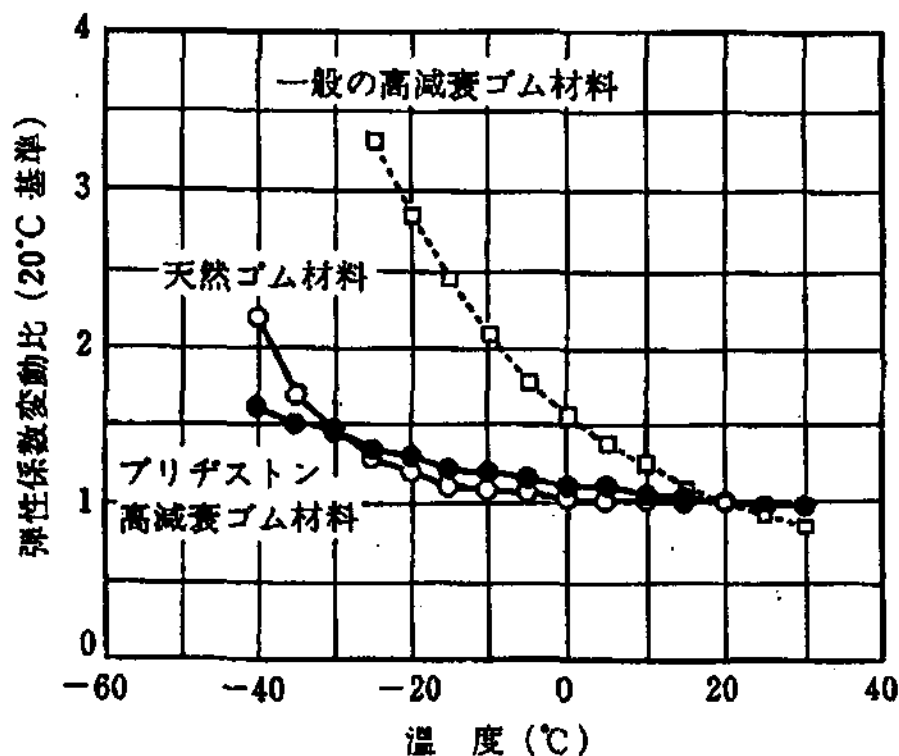
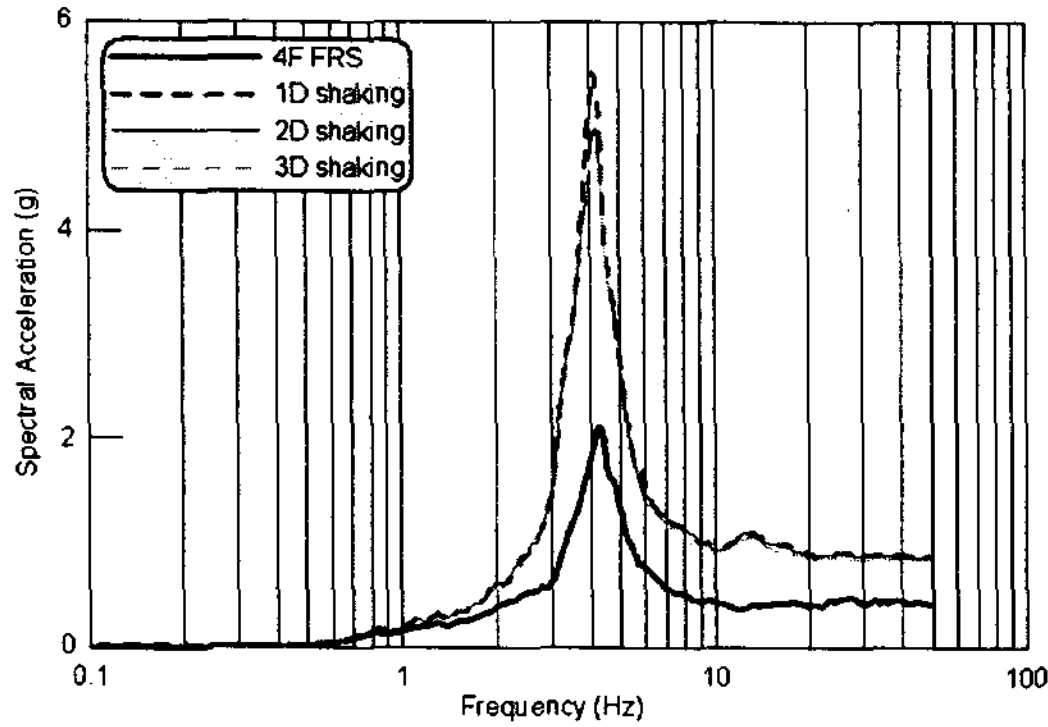


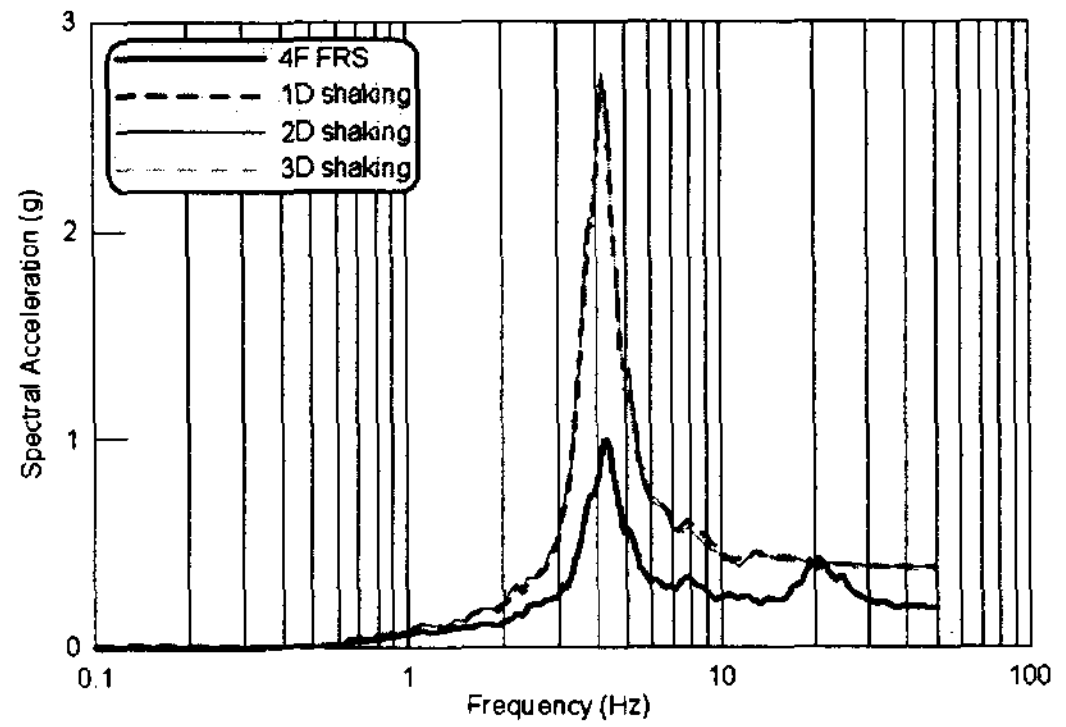
그림 12. 온도에 따른 고무의 탄성계수 변화 (日本免震構造協會, 1997)

#### 4.2 연직진동에 의한 면진거동 분석

본 실험에서는 1방향, 2방향, 3방향 가진을 수행하였으므로 가진차원에 따른 면진장치의 거동을 비교하여 보았다. HDRB와 FPS의 결과를 NRC 설계지진인 경우와 Scenario 지진의 경우에 대하여 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 그림 13과 그림 14에 도시하였다. 그림에서 보는 것과 같이 고무베어링의 경우는 연직방향 지진동성분 또는 수평 직교방향의 지진입력의 작용에 대하여 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이로서 고무베어링이 3방향에 대하여 독립적으로 거동한다는 것을 알 수 있다.

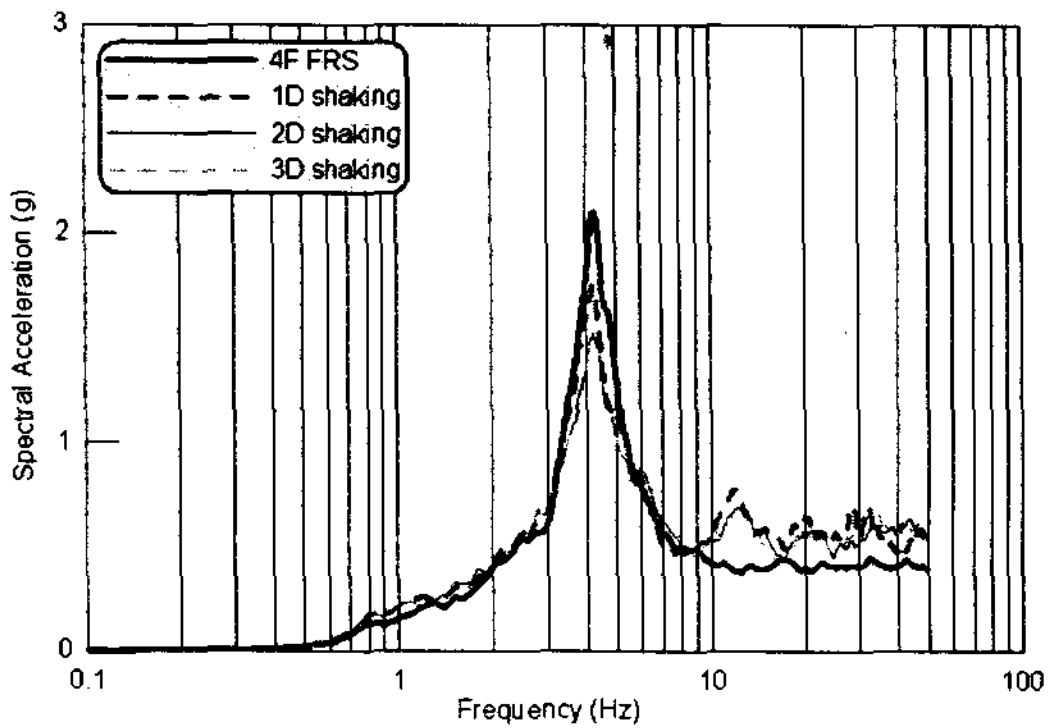


(a) NRC 설계지진

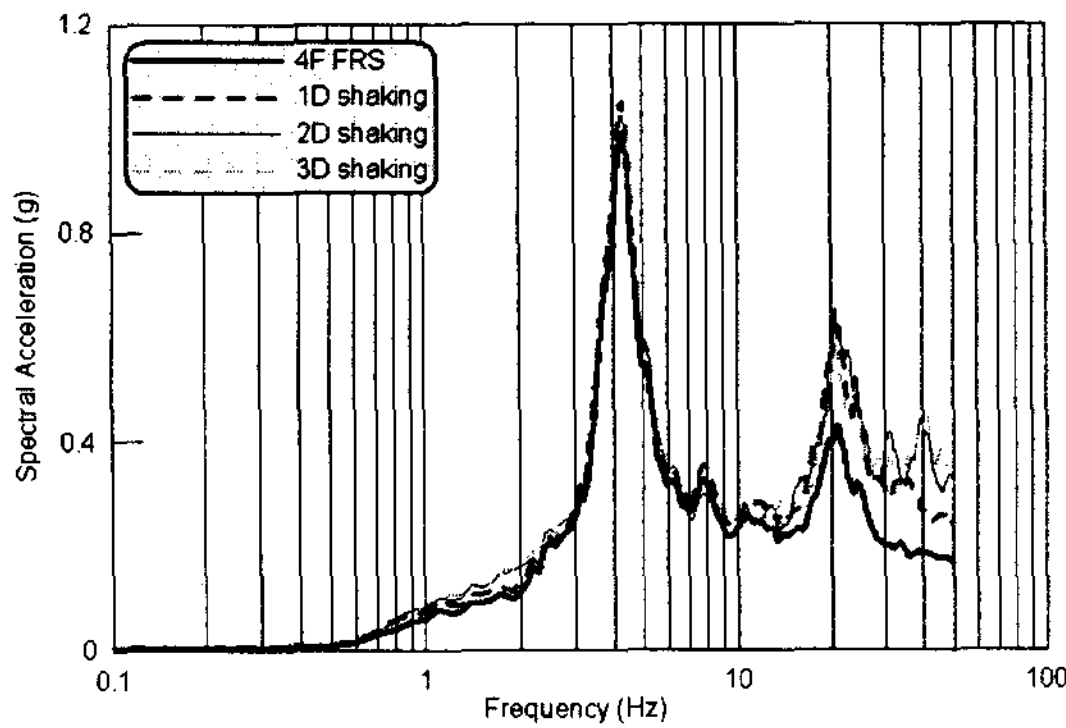


(b) Scenario 지진

그림 13. 가진방법에 따른 면진된 기기의 지진응답 (NRB)



(a) NRC 설계지진



(b) Scenario 지진

그림 14. 가진방법에 따른 면진된 기기의 지진응답 (NRB)

반면 FPS의 경우는 2차원 3차원 가진인 경우 1차원 가진인 경우와 비교하여 응답의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 기존의 실험을 통한 김민규 등(2004a)의 연구에서 고찰한 바와 같이 FPS는 기본적으로 마찰력과 곡면을 이용한 복원력의 결합으로 면진효과를 얻고자 하는 면진장치이므로 연직성분의 지진력이 작용할때는 마찰력에 변화가 생기게 되므로 이러한 결과가 발생하는 것이다. 지진파의 연직성분이 FPS의 마찰력에 변화를 일으키는 것은 면진효과를 감소시킬수도 있고 때로는 면진효과를 증대시킬 수도 있으므로 FPS의 적용시는 이러한 변화에 대한 검



토가 있어야 할 것으로 판단된다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진이 작용한 경우 그 차이가 더 크게 발생하는 것은 고진동수 성분이 NRC 설계지진에 비하여 많이 작용함으로 인하여 FPS 의 면진효과에 더 큰 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 구조물 내부에 존재하는 소형기기에 대한 면진효과를 분석하기 위하여 대상으로 하는 구조물에 대한 수치해석을 통하여 층응답을 도출하였으며 도출된 층응답을 진동대의 입력을 사용하여 진동대 실험을 수행함으로써 구조물 내부에 설치된 기기의 지진응답을 분석하였다. 실험결과 면진기기가 설치된 기존의 구조물을 이용한 실험에 비하여 층응답을 효과적으로 구현할 수 있었다. 반면 사용한 면진장치 1년 6개월 전에 사용했던 동일한 장치를 이용하였고 실험시의 온도차이가 크게 발생함으로 인하여 면진효과가 크게 발휘되지는 않은 결과가 나타났다. 따라서 소형 면진기기에 실제 사용하기 위한 면진장치를 고무베어링을 사용할 경우에는 내구성과 더불어 온도에 의한 영향을 세심하게 고려하여야 할 것으로 판단되며, 그에 반하여 FPS는 이러한 외부환경에 덜 의존적인 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 김민규, 전영선, 최인길, (2004a), 지진파의 수직성분이 기기면진에 미치는 영향 분석, 한국원자력학회 2004 춘계학술발표회 논문집.
2. 김민규, 전영선, 최인길 (2004b), 원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 I : 고무베어링, 한국지진공학회논문집, Vol. 8, No. 5, pp.65-77.
3. 김민규, 전영선, 최인길 (2004c), 원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 II : FPS, 한국지진공학회 논문집, Vol. 8, No. 5, pp.79-89.
4. 日本免震構造協會 (1997), 免震積層コム入門.