

원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 I : 고무베어링

A Shaking Table Test for Equipment Isolation in the NPP (I): Rubber Bearing

김민규* 전영선** 최인길**
Kim, Min-Kyu Choun, Young-Sun Choi, In-Kil

국문요약

본 연구에서는 원전기기의 내진안전성을 향상시키기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 원전 격납건물과 유사한 진동수 특성을 가지는 구조물을 제작하여 실험에 사용하였으며 구조물 내부에 설치된 기기를 모사 하기 위하여 면진장치가 설치된 강체틀력을 층바닥에 설치하였다. 주파수 특성이 상이한 3종류의 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하였다. 면진장치로는 천연고무베어링(NRB)과 고감쇠고무베어링(HDRB)을 사용하여 고무의 감쇠특성에 따른 면진기기의 효율성을 분석하였다. 또한 입력지진동의 주파수 특성에 따라 적절한 면진장치의 기기면진효과를 평가하였다. 실험결과 적절한 면진장치를 사용함으로써 기기의 지진응답을 크게 줄일 수 있으며 지진에 대한 안전성을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 원전기기, 면진장치, 내진안전성, 천연고무베어링, 고감쇠고무베어링

ABSTRACT

In this study, the base isolation systems for equipment in the NPP are presented and the responses of each isolation system are investigated. As for the base isolation systems, a natural rubber bearing (NRB) and a high damping rubber bearing (HDRB) are selected. 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 0.1, 0.2 and 0.25g. The reduction of the seismic forces transmitted to the equipment models are determined for different isolation systems and input motions.

Key words : nuclear equipment, base isolation system, seismic safety, natural rubber bearing, high damping rubber bearing

1. 서 론

원전의 구조물 및 기기들은 그 중요도나 안전요구도에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 불시에 발생할 수 있는 내부 및 외부사건으로부터 경미한 손상을 입었을 경우 그 파급효과가 매우 크게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 원전내 설비는 설계단계에서부터 세심한 주의가 요구되며 가동중에도 항상 그 안전성에 대한 검토와 확인이 필요하다. 이러한 이유로 원전에 설치되어 있는 각종 기기들은 설계허용치내의 지진이 발생시는 충분한 내진여유도를 가질 수 있도록 설계 제작되고 있다. 설계한도를 넘는 지진이 발생하여 구조물 내부의 기기들이 손상을 입을 경우 노심손상 가능성이 증대되며 결과적으로 원전의 안전성에 치명적인 결과를 초래할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 원전 구조물 내부에 설치된 기기에 면진장치를 적용하여 기기의 내진안전성을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 모형구조물을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 모형의 기기에는 3가지의 면진장치를 설치하여 각 면진장치에 따른 면진효과를 분석하고 기기면진에 가장 효과적인 면진장

치를 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. 본 논문에서는 면진장치의 특성에 따라 천연고무베어링과 고감쇠고무베어링에 의한 결과를 분석하며 FPS로 면진하였을 경우의 결과는 별도의 논문에서 기술하도록 한다.

면진장치는 전세계적으로 교량이나 건축물 등의 구조물에 많이 사용되고 있으며, 최근에는 국내에도 그 사용빈도가 증가하고 있는 실정이다. 구조면진과 비교하여 기기면진이 다른점은 구조물에 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.

실험을 위하여 원전 격납건물과 유사한 고유진동수를 가지는 모형구조물을 선정하여 제작하였으며, 강체를 이용하여 구조물 내부의 기기를 모형화 하였다.

이는 면진된 기기의 경우 상부기기는 거의 강체에 가까운 거동을 하게 되며 면진층 상부의 응답만으로도 면진효과를 충분히 파악할 수 있기 때문이다. 입력지진동으로 3종의 지진파를 선정하였다. 선정된 지진파는 1999년 대만에서 발

* 정희원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사
(대표지자 : minkyu@kaeri.re.kr)

** 정희원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 8. 2 / 심사종료일 : 2004. 9. 2)

생한 Chi-Chi 지진시 계측된 실제 근거리 지진 기록과 우리나라 원전부지의 확률론적 지진재해도에 근거한 시나리오 지진과 그리고 우리나라 원전의 설계지진으로 사용되고 있는 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60⁽¹⁾의 표준 응답 스펙트럼을 사용하여 작성된 지진파이다. 구조물의 바닥층과 중간층에 면진된 기기를 설치하고 지진강도를 증가시키면서 가진하여 각 층 바닥과 면진된 기기에서의 응답을 측정하였다.

2. 연구동향

원전기기의 면진에 대한 연구가 최근 일부 수행되고 있지만⁽²⁾ 대부분의 기기면진에 대한 연구는 주로 변전소를 비롯한 전기기기들을 대상으로 연구가 수행되었다.⁽³⁾ 이러한 이유는 과거의 지진시 실제로 원전구조물 또는 기기의 피해가 발생한 예가 보고되고 있지 않은 반면, 그 외 변전설비 등이 피해를 입은 사례가 여러 건 보고되고 있기 때문이다 [3]. 1999년 발생한 Izmit 지진시는 많은 변전설비들이 피해를 입어서 전력생산과 전송에 큰 장애를 초래한 바 있다. 그림 1에서는 Izmit 지진시 피해를 입은 변압기의 모습을 보여주고 있다.



그림 1 Izmit 지진시 손상을 입은 변압기의 모습

지진하중으로부터 구조물을 안전하게 보호할 목적으로 많은 종류의 면진장치가 사용되고 있다. 면진장치는 구조물과 기초사이에 설치하여 기초로부터 전해지는 지진력이 구조물의 상부로 전달되지 않도록 하는 역할을 하게된다. 면진장치의 기계적 특성평가에 관한 연구는 과거에 많이 수행되었으며 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 연구로 김대곤 등⁽⁴⁾의 연구에서는 온도에 따른 고무베어링의 특성을 평가하였으며 유봉 등⁽⁵⁾의 연구에서는 LRB를 사용한 축소시험 모델을 이용한 특성평가를 수행하였다. 전영선 등⁽⁶⁾은 실제

사용하는 LRB에 대하여 다양한 실험조건에서 실험을 수행하여 거동특성 및 기계적 특성을 평가한 바 있다.

본 연구에서 사용한 고무베어링은 전술한 바와 같이 두 종류로서 천연고무베어링 (Natural Rubber Bearing; NRB)와 고감쇠 고무 베어링(High Damping Rubber Bearing; HDRB)이다. 고무베어링으로서 실제로 가장 널리 사용하는 납삽입 적층고무 베어링(Lead Rubber Bearing; LRB)을 사용하지 않은 것은 기기의 경우 구조물과는 달리 상부질량이 상대적으로 작으므로 인하여 LRB를 사용할 경우 면진효과를 발휘하기 어렵다는 판단에 기인한 것이다. 실제로 본 실험을 위하여 LRB의 설계 및 제작을 시도하였으나 전체적인 면진장치의 강성이 증가하여 면진효과를 기대할 수 있는 적절한 강성을 확보하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에서의 면진장치로는 납을 삽입하지 않은 NRB를 선택하게 되었고, NRB에서 부족한 감쇠효과를 보강하기 위하여 HDRB를 선택하여 두가지 장치에 의한 면진거동을 평가하였다.

NRB는 면진장치로서 널리 사용되었으나 감쇠효과가 거의 없으므로 최근에는 별로 사용되지 않는 면진장치이며 HDRB는 감쇠값이 큰 고무를 이용하여 제작한 것으로 LRB와 같은 감쇠특성을 얻고자 하는 면진장치로서 최근 들어 널리 사용하고 있는 면진장치이다. 고무베어링에 대한 연구는 Kelly 등⁽⁷⁾에 의해서 주도적으로 진행되어 왔으며 국내에서도 이에 대한 많은 연구들이 수행되고 있는 상황이다. 고감쇠고무를 이용한 면진장치에 대한 연구는 국내에서는 별로 수행된 바가 없으나 구경희 등⁽⁸⁾이 고감쇠고무베어링에 대한 특성시험 및 비선형 거동해석을 수행한 바 있다. 외국의 경우 이에 대한 실험적, 해석적 연구가 다양하게 수행되고 있는 실정이다. Hwang 과 Ku⁽⁹⁾는 HDRB의 해석적인 모형을 개발하여 실험결과와의 비교연구를 수행하였으며, Watanabe 등⁽¹⁰⁾은 HDRB를 설치한 2층 구조물에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 또한 Abe 등⁽¹¹⁾은 NRB, LRB, HDRB를 모두 교량의 면진에 사용하여 그 결과를 비교한 바 있다.

3. 진동대 실험 개요

3.1 실험대상 구조물 및 모형

본 연구에서는 월성원전 격납건물을 목표로 설정하였다. 그것은 월성원전은 기존에 사용하던 경수로형 원전과 달리 주요 안전관련 기기가 격납건물 내부에 있기 때문이며, 월성원전 인근에 발견된 단층의 활성 여부가 학계에 초미의 관심사로 대두되고 있는 실정이기 때문이다. 월성원전 격납건물의 형상은 다음의 그림 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물은 원통형 shell 구조를 가지고 있으며, 직경은 43.6m 이고 돔구조를 제외한 부분의 높이는 48.14m 이다. 따라서 높이대 폭의 비와 진동수 특성이 유사한 실험모형을 만들기 위하여 다음 그림 3과 같은 3차원 프레임구조를 선택하였다. 실험대상으로 선택한 모형 구조는 4층으로

이루어진 철골구조로서 기둥은 강봉을 선택하였고 슬래브는 강판을 사용하여 제작 하였다. 격납건물의 경우 콘크리트 구조물이므로 강구조로 실험모형을 선정하는 것에 약간의 무리가 있을 수 있으나 모형제작의 편의성과 층응답에 대한 면진장치의 효율성 평가를 위해서는 강구조를 선택하는 것이 적절할 것으로 판단되었다. 제작된 실험모형을 그림 4에서 제시하였다.

유진동수를 구현할 수 있도록 구조물을 설계하였다. 모형의 제작을 위한 기둥과 슬래브의 제원은 표 1에 정리하였다.

표 1 4층 구조물 실험 모형 부재의 제원

항 목	물 성 치	
강관기둥	외경 (cm)	4.27
	내경 (cm)	3.55
	길이 (cm)	50.0
슬래브	제원 (W×D×H, cm)	200×120×4.0

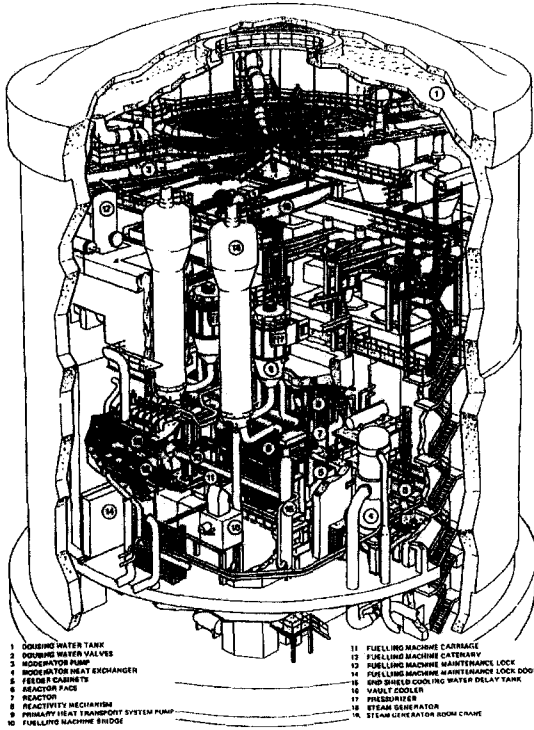


그림 2 월성 2호기 격납건물의 형상⁽¹²⁾

월성원전의 설계자료⁽¹²⁾를 분석한 결과 격납건물의 고유진동수는 4Hz 부근에서 나타나고 있으므로 이와 유사한 고

또한 본 실험의 목적은 원전 격납건물내의 기기에 대한 면진효과를 분석하고자 하는 것이므로 기기를 모사하기 위하여 중량 400kg의 강재블럭을 이용하여 기기를 대신하도록 하였다. 실제로 격납건물내의 기기는 지진발생시 강제거동을 하는 것으로 알려져 있으므로 이와 같은 가정은 타당한 것으로 판단된다. 면진기기는 그림 3에서 보는 바와 같이 1층과 4층의 바닥면에 각 면진장치로 면진시킨 후 설치하였다.

3.2 입력지진파

본 실험에서는 세종류의 지진파를 이용하여 실험을 수행하였다. 우선적으로 국내 원전의 내진설계시 사용하는 US NRC Reg. guide 1.60의 스펙트럼에 부합하는 인공지진가속도 시간이력을 사용하였다. 이 기준은 미국 뿐 아니라 국내의 원전설계시에도 사용하고 있는 표준설계 응답스펙트럼이므로 본 실험과 같이 원전을 대상으로 하고 있는 경우에는 반드시 필요한 지진파이다. 두 번째로는 국내 원전부지의 확률론적 지진해석의 재분해를 통하여 작성된 시나리오 지진에 대한 응답스펙트럼을 기준으로 생성한 인공지진파를 사용하였다.⁽¹³⁾ 시나리오 지진은 국내 지진 및 지반특성을 반영한 지진파를 고려하기 위하여 선정하여 사용

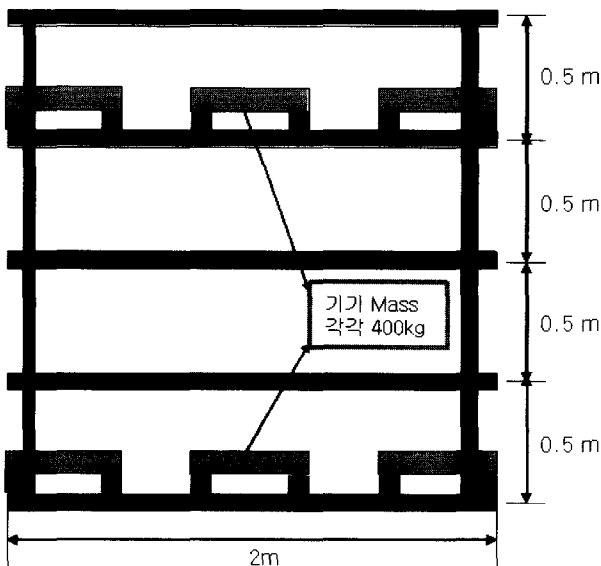


그림 3 실험모형의 제원

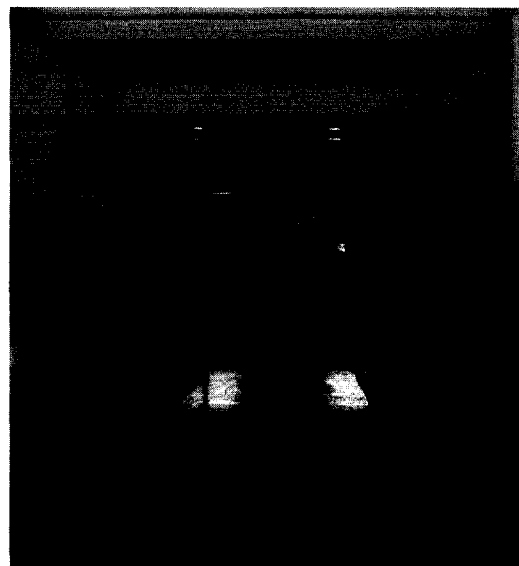


그림 4 면진기기가 설치된 실험모형

하였다. 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 한다. 각각의 지진은 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 3단계로 하여 실험을 수행하였으며 PGA (Peak ground Acceleration) 가 0.1g의 경우에 각각의 가속도 시간이력은 다음의 그림 5에서 제시한 바와 같고 각 지진파의 응답스펙트럼은 그림 6에서 비교하였다.

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.

3.3 면진장치의 설계

본 실험에서는 NRB와 HDRB의 설계를 위하여 상부하중에 따른 목표주파수를 결정하였다. 상부하중의 중량이 작으므로 제작가능한 고무베어링중에 가장 작은 단면을 선택하

여 2.3Hz의 주파수를 가지도록 설계하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 하였다. 본 실험에 사용된 NRB의 설계도면을 그림 7에 제시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 외경이 50mm이고 내경이 30mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고무 한 층의 높이는 8mm이며 5층의 고무가 사용되었으므로 전체 고무높이는 40mm이다. 이러한 형상은 일반적이지는 않으나 실험의 목적에 부합하도록 설계한 것이다. 설계에 따라 제작된 면진장치는 그림 8에서 제시한 바와 같다. NRB와 HDRB는 고무만 다른 종류를 사용하였으며 동일한 형상으로 제작하였다. NRB의 제작에 사용한 고무의 전단탄성계수는 7kgf/cm^2 이다.

3.4 면진장치 특성시험

면진장치의 특성시험을 위하여 수평방향과 수직방향 모두 10ton 용량의 유압가력기(actuator)를 사용하여 성능시험을 수행하였다. 성능시험장치에 면진장치별로 각각 4개씩을 결합하여 강체블록에 직접 설치할 수 있도록 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. 수직하중과 수평하중은 가력기에 설치된 계측기를 이용하여 측정하였고, 수평변위와 수직변위는 각각 변

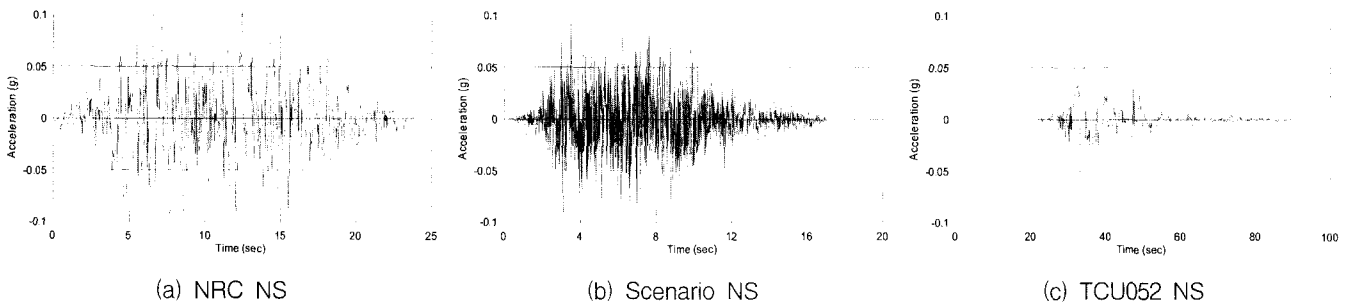


그림 5 입력지진의 가속도 시간이력

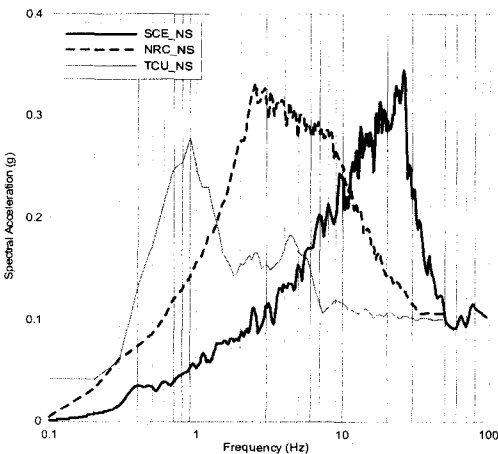


그림 6 입력지진의 가속도 응답스펙트럼 (NS 성분)

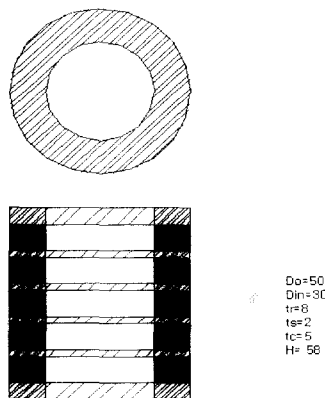


그림 7 NRB와 HDRB의 제작도면 그림

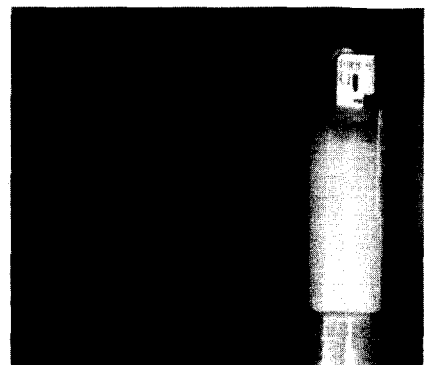


그림 8 실험에 사용한 고무베어링

위계를 이용하여 계측하였다. 시험을 위해서 0.1Hz의 동일한 주파수를 가지는 정현파를 이용하였으며 최대변위를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 최대변위는 10mm, 20mm, 40mm 그리고 55mm로 증가시키면서 각각 10회씩 반복하여 실험을 수행하였다. 연직방향 하중은 강체블록의 질량과 동일한 하중이 작용하도록 하였으며 전체적으로 변위제어 방식으로 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 하중의 수평방향 변위-시간이력은 그림 9에 도시하였다.

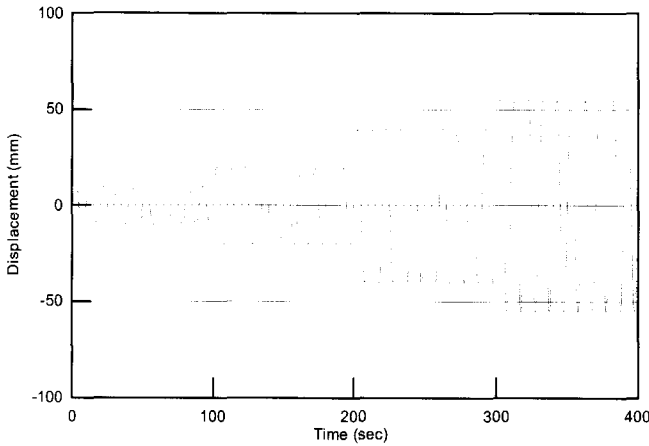


그림 9 특성시험을 위한 수평하중의 변위-시간이력

NRB와 HDRB의 수평방향 특성시험으로부터 얻은 하중-변위 관계를 그림 10에 각각 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 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 상당히 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 평가

될 수 있다는 것을 의미한다.

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 휨변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

면진장치 특성시험에 의한 NRB와 HDRB의 감쇠비를 다음의 표 2에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 최대변위가 증가함에 따라 감쇠비가 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 NRB와의 감쇠비의 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 이것은 고무의 특성만에 의한 것이라기 보다는 면진장치기 휨변형을 일으킴에 기인한 것으로 판단된다.

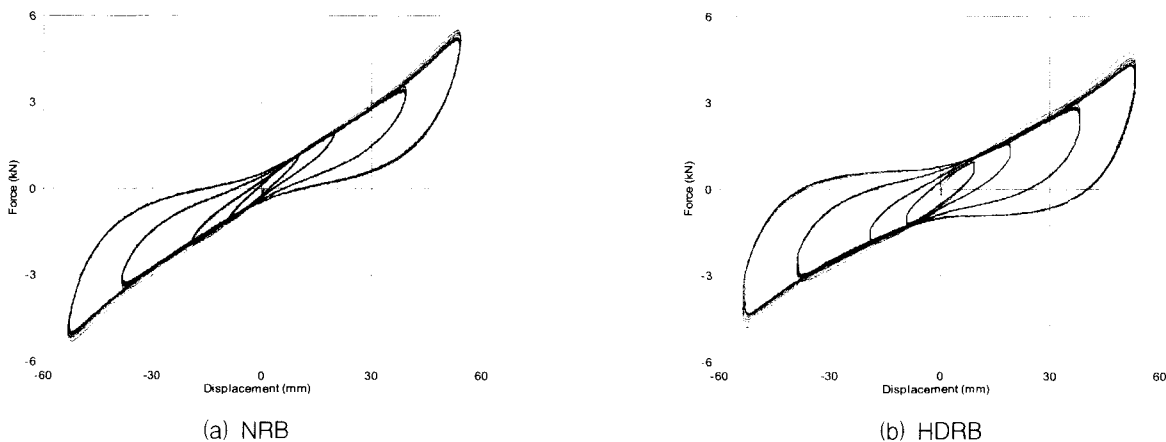
표 2 NRB와 HDRB의 감쇠비 변화

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
HDRB/NRB		6.7	2.06	2.12	1.88

4. 실험결과 및 분석

4.1 개요

실험대상 구조물에 대하여 1차원, 2차원 그리고 3차원 가진을 수행하여 그 결과를 비교하였으며, PGA에 따른 차이를 분석하기 위하여 PGA를 달리하여 실험을 수행하였다. 단계별 실험 전후에는 전체 시스템의 손상여부를 검토하기 위하여 랜덤진동에 의한 Modal 실험을 수행하였다. 실험의 순서는 다음의 표 3에 간략히 정리하였다. 표에서는 간단하게



(a) NRB

(b) HDRB

그림 10 고무베어링의 수평전단시험에 의한 하중-변위 곡선

정리하였지만 전체 37회의 가진실험을 수행하였다. 전체의 가진횟수가 많아진 것은 본 실험에서는 주로 PGA, 가진 방향(1-D, 2-D, 3-D) 및 입력 지진파의 종류에 의한 영향을 살펴보고자 하였기 때문이다. 실험결과는 기본적으로 PGA를 중심으로 살펴보았다. 따라서 실제 진동대에 입력된 지진동의 PGA와 기기 및 각 층에서 측정된 최대가속도를 이용하여 면진효과를 평가하였다. 실험에서는 표에서 제시한 바와 같이 목표 PGA와 지진파를 정하고 있지만 그것을 진동대에서 정확하게 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 3 진동대 실험순서

실험순서	Earthquake Motion	PGA(g)	비 고
1	Modal Test (White Noise)	0.05	Frequency check
2	Scenario, NRC, TCU052	0.1	1D, 2D, 3D
3	Modal Test (White Noise)	0.05	Frequency check
4	Scenario, NRC, TCU052	0.2	1D, 2D, 3D
5	Modal Test (White Noise)	0.05	Frequency check
6	Scenario, NRC, TCU052	0.25	1D, 2D, 3D
7	Modal Test (White Noise)	0.05	Frequency check

4.2 랜덤진동시험에 의한 구조물 동특성 추정

전술한 바와 같이 진동대실험의 중간에 랜덤진동을 이용한 Modal 실험을 수행하였다. Modal 실험을 수행하는 이유는 실험의 중간에 구조물 전체의 고유진동수를 평가함으로써 실험모형의 손상여부를 판단하기 위함이다. Modal 실험은 면진기기가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우에 대해서 모두 수행하여 기기설치에 따른 실험모형의 고유진동수의 변화를 측정하였다. Modal 실험결과는 다음의 그림 11에 도시하였다.

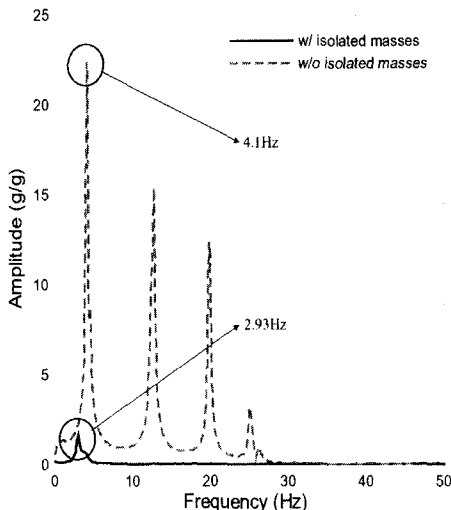


그림 11 랜덤진동에 의한 실험결과

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. 그림에서 보는 것과 같이 면진기기가 설치되었을 때 1차모드를 제외하고는 대부분의 모드가 사라지는 것을 알 수 있으며 1차모드의 고유주파수가 면진기기의 설치로 인하여 상당부분 저주파 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 본 실험의 경우는 구조물 전체의 중량에 비하여 면진기기의 중량의 비율이 상당히 크기 때문에 면진기기에 의하여 구조물 전체의 동적 특성에서 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

4.3 최대가속도분석

먼저 목표로 설정한 PGA에 따라 실제로 진동대에 입력된 지진파의 PGA와 그에 따른 각 기기에서의 응답을 최대가속도만을 중심으로 정리하여 1층의 기기와 4층의 기기에 대하여 각각 표 4와 5에 정리하였다.

표 4에서 보는 바와 같이 실제로 목표로 한 지진의 PGA를 진동대에서 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 지진파형을 그대로 구현하는 것 또한 용이한 일은 아니다. 면진기기에서의 응답을 보면 지진파에 따라서 면진효과가 현저하게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 고주파수에서 탁월주파수가 형성되어 있는 Scenario 지진의 경우는 면진효과가 좋은 반면 NRC와 TCU052의 경우는 상대적으로 지진력 저감효과가 적을 것을 알 수 있다.

표 5에서 입력지진과 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 구조물의 고유진동수는 2.9Hz 인 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.

4.4 지진응답비 분석

1층 기기와 4층 기기에 대하여 각 층에서의 총응답가속도와 기기에서의 응답가속도를 단순 비교하므로써 면진장치의 면진성능을 평가하였다. 지진응답비는 다음 식과 같이

표 4 1층 면진기기의 가속도 응답

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

표 5 구조물 및 4층 기기에서의 지진응답

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

정의되며 1층 기기와 4층 기기에 대하여 표 6에서 제시하였으며 전체적인 경향을 파악하기 위하여 각 진동대 실험 경우마다 1방향 가진에 대한 지진응답비를 그림 12 및 13에 도시하였다.

$$\text{지진응답비} = \frac{\text{기기응답최대가속도}}{\text{Table 최대가속도}}$$

표와 그림에서 보는 바와 같이 1층에 설치된 면진 기기의 경우 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 있었던 것으로 판단된다. 4층의 기기의 경우도 지진응답비가 1을 상회하는 것이 있지만 많은 경우 지진력 저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 특이한 사실은 1층기기의 경우는 HDRB의 지진력저감효과가 좋은 반면 4층 기기는 NRB의 효과가 더 좋다는 사실이다. 이러한 결과는 HDRB의 감쇠력이 공진영역에 해당하는 1층의 기기에서 지진력을 저감시킨 영향과 1층의 입력지진은 NRB의 고유진동수와 가깝고, 4층의 층응답은 HDRB의 고유진동수와 가깝기 때문에 발생한 결과이다.

1층 기기에서는 지진파에 따라 지진력저감효과가 확연하게 차이가 나는 것을 볼 수 있는 반면 4층 기기는 그렇지

않은 것을 알 수 있다. 1층에서는 입력지진이 그대로 입력이 되었지만 4층의 경우는 구조물 특성에 의하여 지진파가 변화되었기 때문인 것이다. 1층과 4층 모두 Scenario 지진의 경우는 면진효과가 가장 우수한 반면 NRC의 설계지진시는 면진효과가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. NRC 설계응답스펙트럼에서도 알 수 있듯이 설계지진의 탁월주파수가 2-7Hz 부근이므로 충분한 면진을 위해서는 1Hz 미만의 저주파로 면진장치를 설계해야 할 것이다. 이 경우 1Hz 부근에서 탁월주파수대가 형성이 되어 있는 TCU052와 같은 저주파 근거리지진시 면진효과가 떨어지므로 이 모든 경우를 만족시키기 위해서는 목표진동수가 더 작은 면진장치를 설계하여야 하지만 이러한 고무베어링은 현 조건에서 제작이 불가능하므로 다른 면진장치를 선택하도록 해야 할 것이다.

또한 지진응답비에 대한 그림 12와 13를 보면 각 지진파의 PGA에 따라서 지진응답비가 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 Scenario의 경우 1차원 가진인 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. 1Hz, 2.3Hz 그리고 3Hz에서의 스펙트럴 응답값을 각 지진파별로 그림 14에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 정규화된 응답스펙트럼의 응답값이 각 지진파별로 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. Scenario의 경우 목표 PGA가 가장 작은

표 6 기기의 층응답에 대한 지진응답비율

지진파	목표 PGA	Scenario				TCU052				NRC			
		1층		4층		1층		4층		1층		4층	
		HDRB	NRB	HDRB	NRB	HDRB	NRB	HDRB	NRB	HDRB	NRB	HDRB	NRB
1D	0.1g	0.88	0.93	1.42	1.29	0.88	0.93	1.42	1.29	0.88	0.93	1.42	1.29
	0.2g	0.61	0.55	0.78	0.72	0.61	0.55	0.78	0.72	0.61	0.55	0.78	0.72
	0.25g	0.52	0.55	0.81	0.77	0.52	0.55	0.81	0.77	0.52	0.55	0.81	0.77
2D	0.1g	0.83	0.98	1.35	1.09	0.83	0.98	1.35	1.09	0.83	0.98	1.35	1.09
	0.2g	0.56	0.54	0.67	0.71	0.56	0.54	0.67	0.71	0.56	0.54	0.67	0.71
	0.25g	0.47	0.56	0.69	0.67	0.47	0.56	0.69	0.67	0.47	0.56	0.69	0.67
3D	0.1g	0.78	0.94	1.28	0.98	0.78	0.94	1.28	0.98	0.78	0.94	1.28	0.98
	0.2g	0.56	0.57	0.60	0.61	0.56	0.57	0.60	0.61	0.56	0.57	0.60	0.61
	0.25g	0.43	0.58	0.64	0.61	0.43	0.58	0.64	0.61	0.43	0.58	0.64	0.61

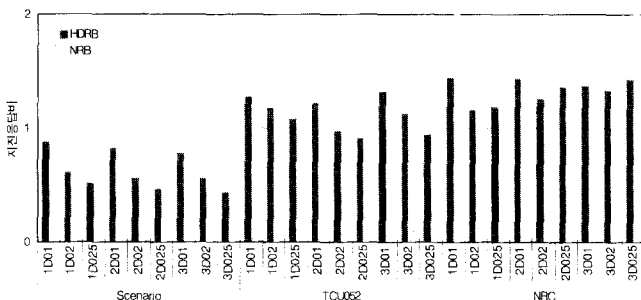


그림 12 1층 기기의 지진응답비율

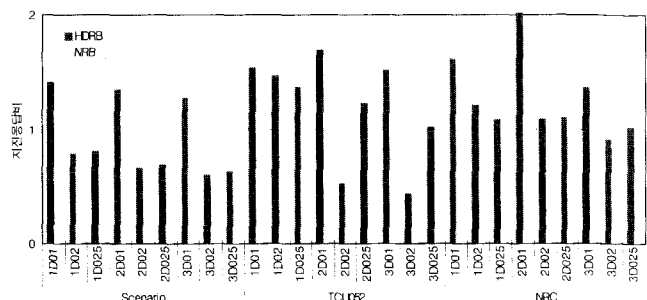


그림 13 4층 기기의 지진응답비율

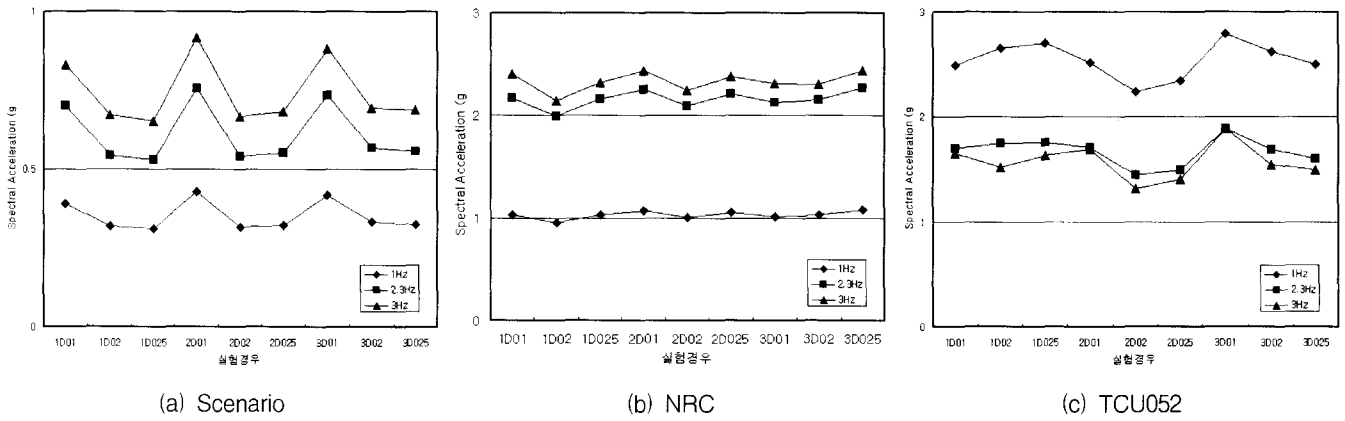


그림 14 주파수에 따른 입력지진의 정규화된 응답스펙트럴 가속도

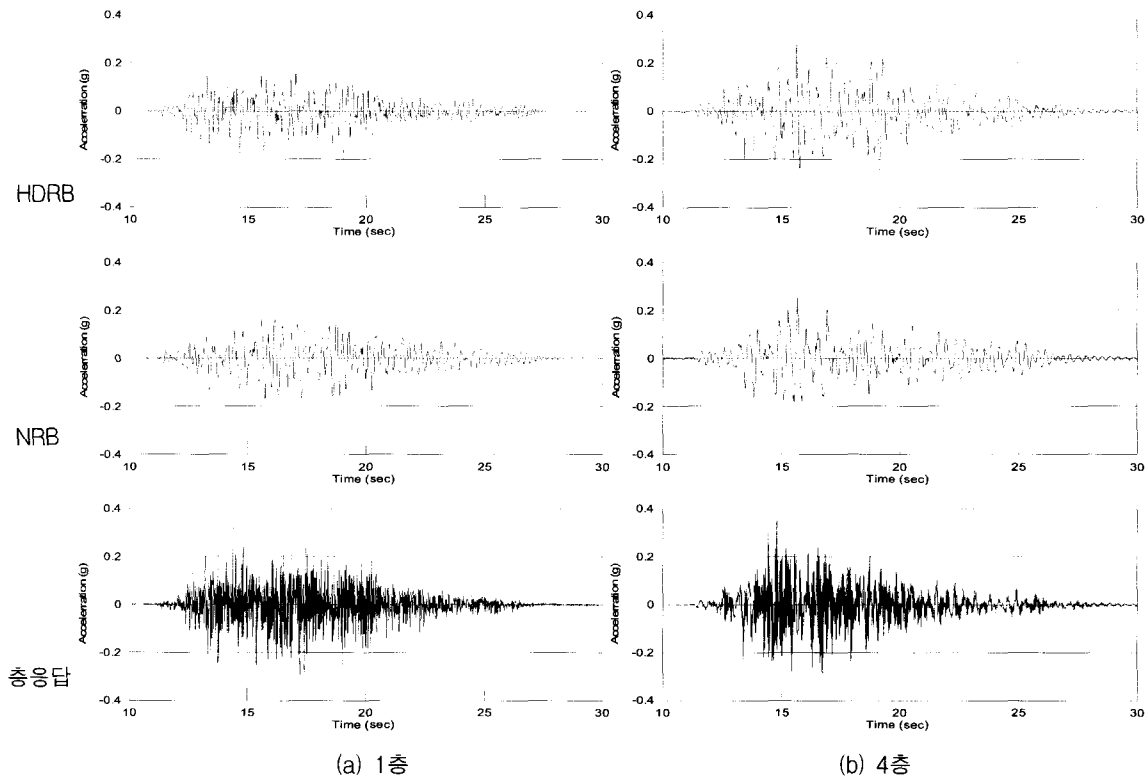


그림 15 Scenario 입력지진에 대한 응답(1D, 0.2g)

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 Scenario만큼 명확하게 나타나지는 않지만 전체적으로 0.1g를 목표 PGA로 한 경우의 응답이 가장 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험과 같이 면진장치가 선형거동을 하는 것으로 판단되는 경우는 PGA와 면진효과와는 큰 상관관계를 발견하기 어려운 것으로 판단된다.

4.5 시간이력 분석

다음으로 목표 PGA 0.2g인 경우 1층과 4층에서 각 기기의 응답가속도 시간이력을 그림 15-17에 비교하였다. 면진

기기의 지진응답뿐만 아니라 각 층에서의 계측된 가속도 응답을 같이 도시하여 실제 면진기에 작용한 지진하중과 면진장치에 의해 면진된 효과를 동시에 비교할 수 있도록 하였다. 시간이력에서도 입력지진의 고주파수 성분이 면진장치에 의해서 상당부분 감소하였음을 알 수 있다. 앞에서 정량화하여 비교한 것과 동일하게 구조물 내부의 기기는 면진효과가 큰 것으로 나타났다. NRB와 HDRB는 초기강성이 작으므로 진동초기부터 움직임이 관찰되는 것을 알 수 있다. 결국 고무베어링의 경우는 공진주파수대의 위치에 따라 면진효과가 크게 변화하기 때문에 입력지진의 공진영역과, 기기면진인 경우 기기가 설치되어 있는 구조물의 진동특성을 정확하게 예측할 수 있다면 NRB와 HDRB와 같은 고무베어링을 사용해서 소형기기의 면진에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

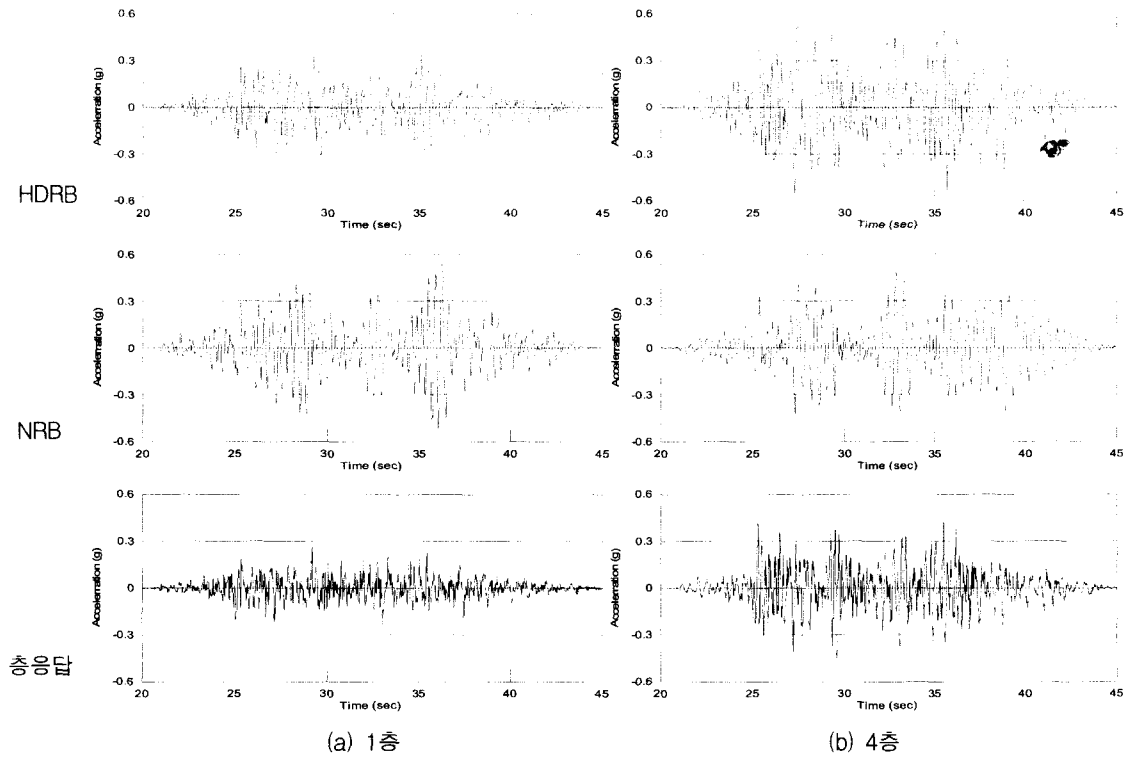


그림 16 NRC 입력 지진에 대한 응답(1D, 0.2g)

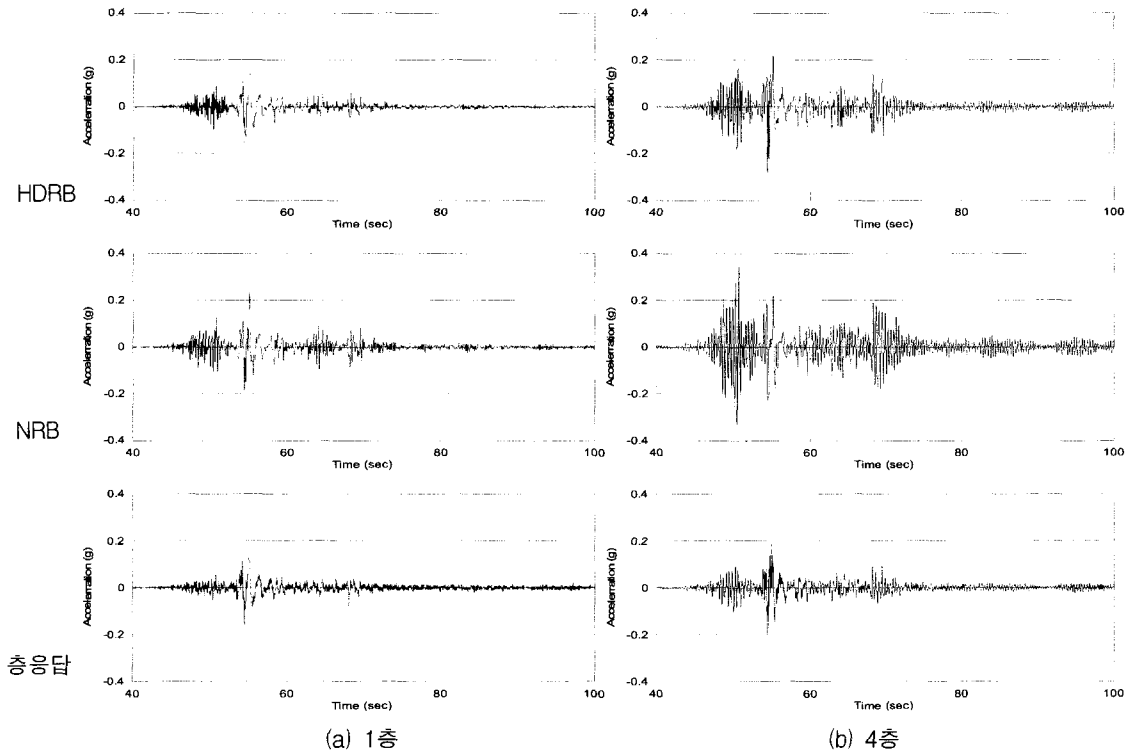


그림 17 TCU052 입력지진에 대한 응답(1D, 0.2g)

4.6 응답스펙트럼 분석

각 지진파에 따른 면진기기에서의 응답을 응답스펙트럼으로 표시하여 그림 18~20에 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, 4층에 위치한 기기의 경우에는 구조물의 고유진동수에 해당되는 4Hz 부근에서 층 응답스펙트럼이 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 큰 면진효과를 나타낼 수 있는 것을 알 수 있다.

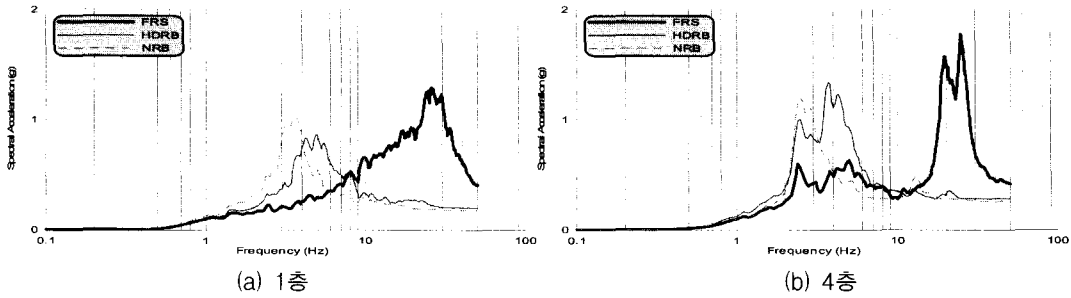


그림 18 Scenario 지진시 응답스펙트럼 (1D, 0.2g)

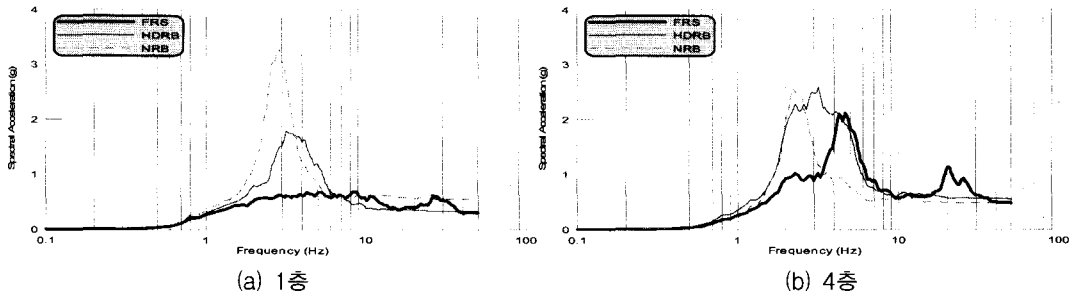


그림 19 NRC 지진시 응답스펙트럼 (1D, 0.2g)

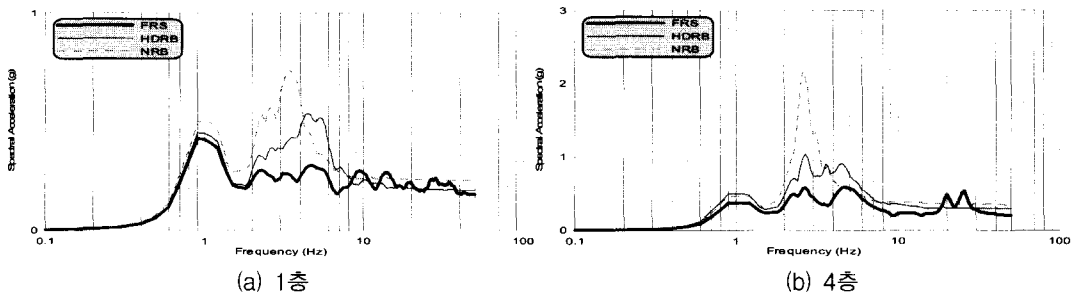


그림 20 TCU052 지진시 응답스펙트럼 (1D, 0.2g)

5. 해석결과와의 비교

면진장치의 해석을 위해서는 특성시험에서 나타난 이력 거동을 정확하게 구현할 수 있는 모델을 구성하는 것이 유리하지만 본 연구에서는 해석과 적용의 편의성을 고려하여 다음 그림 21과 같은 탄성-감쇠모델을 적용하였다. 진동대 시험결과 NRB와 HDRB로 면진된 기기에서의 변위가 10mm 이내이므로 그 시점에서의 특성시험 결과를 고려하여 유효강성과 등가감쇠비는 표 7과 같이 결정하였다.

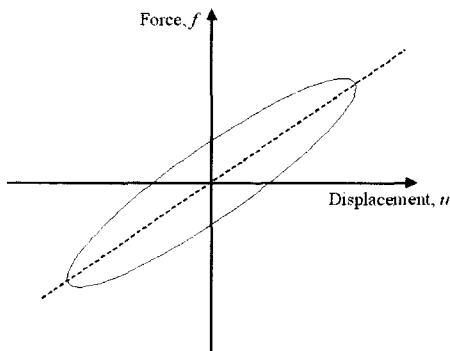


그림 21 고무베어링의 해석에 사용한 탄성-감쇠모델

표 7 NRB와 HDRB의 해석모델

구분	유효강성 (tonf/m)	등가감쇠비 (%)
NRB	6	2.2
HDRB	3.2	14.8

수치해석에는 탄성범위의 해석에 널리 사용되는 범용상용 프로그램인 SAP2000을 이용하였으며 면진기기의 거동예측이 가능함을 알아보고자 하였다. 해석결과는 면진장치 자체만의 거동을 비교하기 위하여 1층에서의 응답만을 비교하였다. NRC지진에 대한 해석결과를 다음의 그림 22와 23에 제시하였다. 또한 그림 24에 응답스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험에 사용한 면진장치는 탄성-감쇠 모형으로 충분히 그 거동을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 원전기기의 내진안정성을 향상시키기 위한 방안으로 면진기기에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- NRB와 HDRB를 사용한 진동대 실험결과 두가지 면진

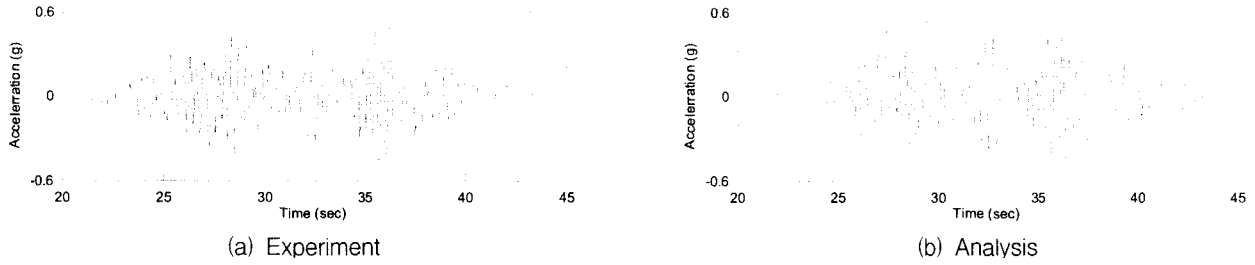


그림 22 실험 및 해석에 의한 시간이력 비교 (NRB)

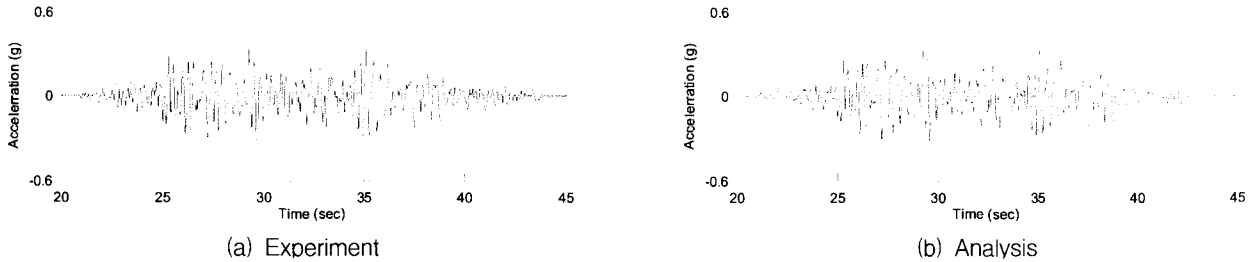


그림 23 실험 및 해석에 의한 시간이력 비교 (HDRB)

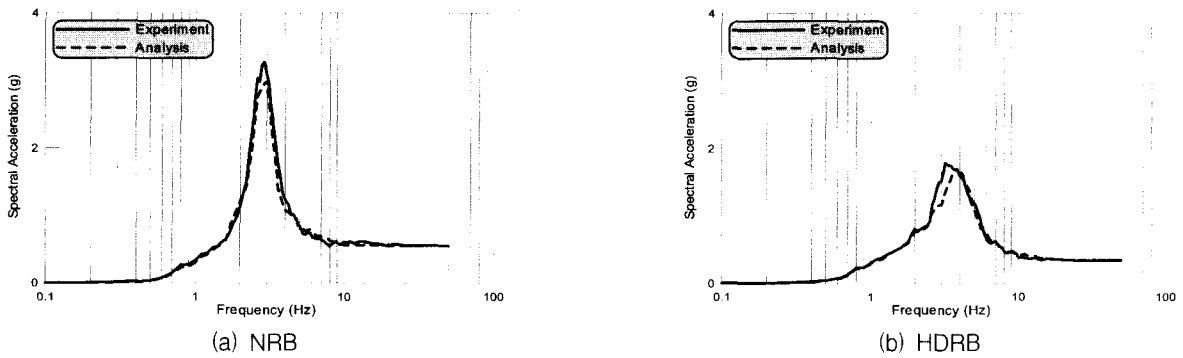


그림 24 실험 및 해석에 의한 응답스펙트럼 비교

장치 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.

- 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 소형기기의 면진에 효과적일 수 있음을 보였다.
- 국내 원전부지의 특성을 고려하여 개발된 인공지진을 이용한 진동대 실험결과 개발된 지진의 탁월주파수 영역이 20Hz 이상의 고주파수 성분이므로 면진효과가 우수하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구인 "구조물 건전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

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*, Vol. 17, No. 4, 2001, pp. 569-595.
4. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철립, "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제4호, 1998, pp. 53-62.
5. 유봉, 이재한, 구경희, 권혁신, "금속로 면진설계를 위한 축소규모 납삽입 및 3차원 면진베어링의 특성시험 결과분석", KAERI/TR-1362/99, 한국원자력연구소, 1999.
6. 전영선, 최인길, 유문식, "수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가", 한국지진공학

- 회 논문집, 제5권, 제6호, 2001, pp. 1-10.
7. Kelly, J.M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer, 1997.
 8. 구경희, 이재한, 유봉, “면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석”, 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호, 1998, pp. 73-85.
 9. Hwang, J.S. and Ku., W, “Analytical Modeling of High Damping Rubber Bearings,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 8, August 1997.
 10. 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.
 11. Abe, M., Fujino, Y., and Yoshida, J., “Dynamic Behavior and Seismic Performance of Base-Isolated Bridge in Observed Seismic Record,” *12th WCEE*, 2000.
 12. “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.
 13. 최인길, 전영선, 서정문, “원전부지 시나리오지진 설정 방법에 대한 고찰”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2443/2003, 2003.
 14. 日本免震構造協會, 免震積層コム入門, 1997.