

# 기기면진을 위한 면진장치의 거동분석실험 (II) : 감쇠특성 분석

## An Experimental Study of the Seismic Isolation Systems for Equipment Isolation : Evaluation of Damping Effect

전영선\*      김민규\*\*      최인길\*\*      김영중\*\*\*  
Choun, Young Sun    Kim, Min Kyu    Choi, In Kil    Kim, Young Joong

### ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies on the equipment isolation effect in the nuclear containment. For this purpose, shaking table tests were performed. The natural rubber bearing (NRB) and high damping rubber bearing (HDRB) were selected for the isolation. Peak ground acceleration, damping characteristics of isolation system and frequency contents of selected earthquake motions were considered. Finally, it is presented that the NRB and HDRB systems are effective for the small equipment isolation and the damping of isolation systems can be affected to the seismic isolation effect.

**Key word** : equipment isolation, nuclear containment, shaking table test, Natural Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB)

### 1. 서론

국내에 원전이 가동되어 전력원으로서의 역할을 감당한 것은 1978년 고리 1호기가 처음으로 약 25동안 운영되고 있다. 그럼에도 원전 특히 격납건물의 안전성에 관한 연구는 끊임없이 이루어지고 있으며 이러한 기술이 일반 토목기술을 선도하고 있는 실정이다. 격납건물이 손상을 입을 수 있는 외부의 사건들은 여러 가지가 있을 수 있으나 그 발생빈도와 피해규모를 고려했을 때 지진은 매우 중요하게 다루어지고 있다. 따라서 지진에 대한 원전의 안전성을 향상시키고자 하는 노력은 반드시 필요하며 시설의 내진성능을 향상시키고자 하는 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 외국의 경우 이에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있는 상황이며, 국내에서도 이러한 연구가 시작되어 폭넓게 진행되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 본 연구에서는 구조물 자체의 안전성을 향상시키기 위한 방법에서 좀 더 적극적인 방법으로 격납건물 내부의 기기에 대한 면진을 시도함으로써 원전 전체의 안전성을 향상시킬 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하기 위하여 모형구조물을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 기기에 설치하는 면진장치로는 기존에 널리 구조물의 면진장치로 사용

\* 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임기술원, 공학박사, 정회원

\*\* 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사, 정회원

\*\*\* 한국기계연구원 구조시스템연구부 선임연구원, 정회원

되어지고 있는 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB)과 고감쇠고무베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였으며 진동대 실험을 위한 지진파는 탁월주파수 영역이 상이한 3종류의 지진파를 선정하여 실험을 수행하였다. 특별히 최근 일본의 Kobe 지진과 대만의 Chi-Chi 지진 이후에 많은 관심이 집중되고 있는 근거리 지진파를 입력지진으로 선정하고 그에 따른 면진장치의 거동을 분석하였다.

## 2. 실험대상 구조물 및 모형

본 연구에서는 특별히 월성원전 2호기 격납건물을 목표로 설정하였다. 그것은 월성원전이 국내에서 최초로 도입된 중수로형 원전일 뿐만 아니라, 월성원전 인근에 발견된 단층의 활성단층 여부 학계에 초미의 관심사로 대두되고 있는 실정이기 때문이다. 실험에 사용할 모형구조물은 월성원전의 설계자료를 검토하여 다음의 그림 1과 같이 선정하였다<sup>[3][4]</sup>. 또한 본 실험의 목적은 원전 격납건물내의 기기에 대한 면진효과를 분석하고자 하는 것이므로 기기를 모사하기 위하여 그림과 같이 각각 중량 400kg의 강재를 이용하여 기기를 대신하도록 하였다. 실제로 격납건물내의 기기는 지진발생시 강체거동을 하므로 이와같은 가정은 타당할 것으로 판단된다.

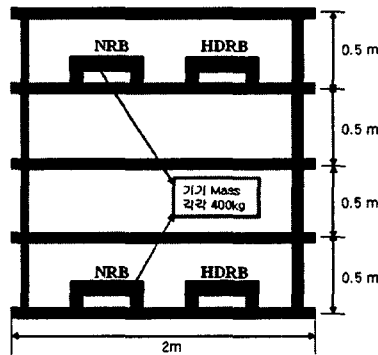


그림 1. 실험대상 구조물 및 기기모형

## 3. 지진파의 선정

본 실험에서는 3가지의 지진파를 이용하여 실험을 수행하였다. 각 지진기록은 근거리 지진의 성분을 갖도록 만들어진 인공지진시간이력(SCE)과 원전의 설계를 위한 표준응답스펙트럼을 이용하여 생성된 인공지진(NRC), 그리고 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 계측된 지진(TCU)이다. 각각의 지진은 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 3단계로 하여 사용하였으며 0.1g의 경우에 각각의 가속도 시간이력은 다음의 그림 2에 제시한 바와 같고 각 지진파의 응답스펙트럼은 그림 3에서 비교하였다.

응답스펙트럼의 비교를 통해서 입력으로 사용한 지진의 실험의 목적에 부합되도록 탁월주파수 영역이 확연하게 차이가 나는 것을 알 수 있다. SCE의 경우는 25Hz, NRC의 경우는 2.5Hz, 그리고 TCU의 경우 1Hz 부근에서 탁월주파수대가 형성이 되고 그 외의 영역에서는 큰 폭으로

감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 것은 원전 표준 설계응답 스펙트럼[5]의 경우 미국 서부에서 발생하는 지진파들을 분석하여 작성된 것이므로 국내의 지반 및 지질조건을 반영하기 위하여 저진동수 부분을 감소시키고 고진동수부분을 부각시킨 SCE 지진을 적용한 것이며, TCU 지진의 경우는 가장 최근에 큰 피해를 준 근거리 지진으로서 저진동수 영역이 상당히 증폭되어 있으므로 입력지진으로서 선정하였다.

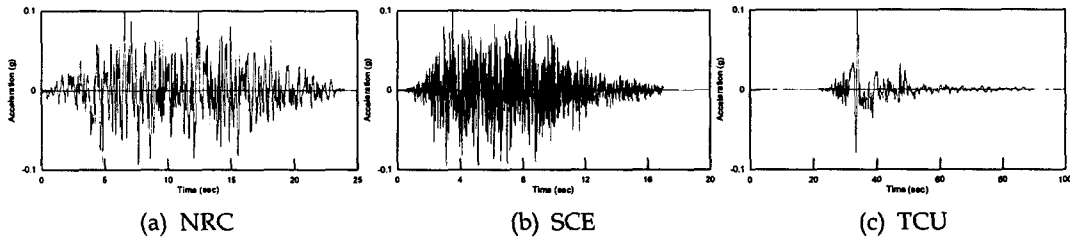


그림 2. 입력지진의 가속도 시간이력

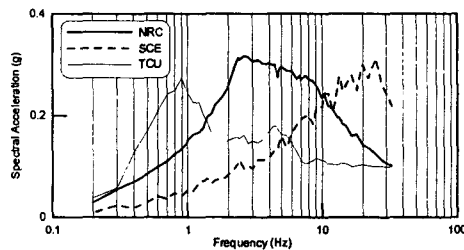


그림 3. 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

#### 4. 면진장치의 선정 및 설계

본 실험에서는 소형기기의 면진효과를 분석하기 위하여 천연고무 베어링(Natural Rubber Bearing: NRB)과 고감쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)를 사용하였다. HDRB의 경우는 납을 삽입하지 않고도 감쇠효과를 크게 발휘할 수 있기 때문에 면진장치로서 새롭게 널리 사용하고 있으며 이에 대한 연구가 세계적으로 많이 진행되고 있는 실정이다<sup>[6][7]</sup>. 본 실험에서 현재 토목구조물에서 널리 사용하는 납삽입고무베어링(Lead Rubber Bearing: LRB)를 사용하지 않은 것은 LRB는 납이 삽입되므로 감쇠비를 증가시킬 수 있는 반면 수평강성이 상대적으로 크기 때문에 본 실험과 같이 400Kg 정도의 저중량 기기의 면진에 사용하기에는 적절하지 않기 때문이다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. 면진장치의 목표주기는 0.43초로 설계하였다. 본 실험의 경우는 1초 이상의 주기를 가지는 면진장치를 제작할 경우 면진효과가 우수하게 나타날 수 있으나 그러한 면진장치는 제작이 불가능하므로 제작가능한 가장 큰 주기를 구현할 수 있도록 하여 설계를 하였다. 본 실험에 사용된 면진장치의 제원은 다음의 그림 4에 제시한 바와 같이 직경 50mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였다. 설계에 따라 제작된 면진장치의 모형은 다음 그림 5에서 제시한 바와 같다. NRB와 HDRB는 고무만 다른 종류를 사용하였으며 동일한 형상으로 제작하였다. 면진장치는 모형기기별로 4개씩 설치하여 그림 6과 같이 설치하였다.

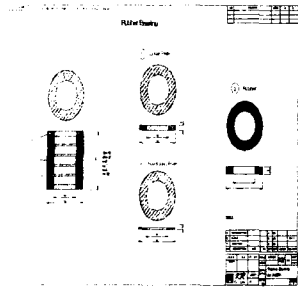


그림 4. 면진장치의 제원

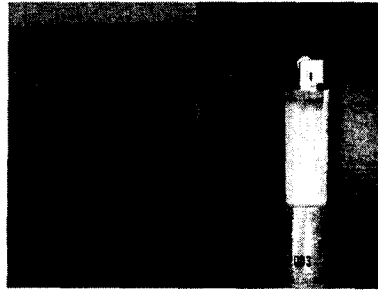


그림 5. 제작된 면진장치



그림 6. 기기에 설치된 모습

## 5. 진동대 실험 및 결과분석

### 5.1 PGA에 따른 분석

전술한 바와 같은 실험모형에 1층과 4층의 바닥판에 각 400kg의 강체를 이용하여 기기를 모사하고 2가지 면진장치를 이용하여 지진격리시켰다. 각 기기와 면진장치가 설치된 모습은 그림 1에 제시한 바와 같다. 실험은 지진별로 0.1g, 0.2g 그리고 0.25g의 3단계로 수행하였으며, 따라서 결과적으로 9가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 계측은 가속도계를 이용하였으며, 두 개 층의 기기 4종과 floor까지 6지점에서 1방향 계측을 실시하였다. 지진파에 따른 실험 경우 및 각 계측점에서의 PGA는 다음의 표 1에 정리한 바와 같다.

표 1. 기기별 응답 PGA

(단위 : g)

지진파	Target PGA	Real PGA	1층		4층		
			NRB	HDRB	층 응답	NRB	HDRB
SCE	0.1	0.1327	0.1229	0.1166	0.1298	0.0167	0.01839
	0.2	0.3222	0.1771	0.198	0.3516	0.0251	0.02754
	0.25	0.4144	0.2299	0.2135	0.3894	0.0301	0.03145
TCU	0.1	0.0848	0.1258	0.1083	0.1364	0.0167	0.02099
	0.2	0.1576	0.2325	0.1853	0.2025	0.0346	0.02976
	0.25	0.1921	0.2782	0.2071	0.2845	0.0295	0.03911
NRC	0.1	0.1319	0.2657	0.1905	0.2103	0.0319	0.034
	0.2	0.2869	0.5502	0.3328	0.4592	0.0481	0.0556
	0.25	0.3311	0.6046	0.3914	0.6626	0.057	0.0716

표에서 보는 바와 같이 목표지진파 실제지진파는 많은 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 목표지진을 진동대가 모사하는 과정에서 발생한 것으로 이러한 현상을 반영한 분석을 수행하였다. 실험결과를 보면 1층의 경우는 입력지진대비 면진된 기기에서의 응답이 별로 감소하지 않거나 오히려 증폭된 경우도 있는 것을 알 수 있다. 이것은 면진장치의 설계시 구조물의 층응답스펙트럼을 산정하여 지진력을 감소시킬 수 있도록 제작하였으므로 1층의 경우는 지진파에 따라 지진파의 탁월주파수대와 면진장치의 공진영역이 일치하는 경우가 발생하였다. 이러한 현상을 좀더 자세하게 비교해 볼 수 있도록 입력지진대비 면진기기에서의 지진응답비를 산출하여 다음의 표 2와 그림 7에 제시하였다.

표 2. 기기별 지진응답비율 (%)

지진파	목표 PGA (g)	1층 기기		4층 기기			
				4층 기준		1층 기준	
		NRB	HDRB	NRB	HDRB	NRB	HDRB
SCE	0.1	93	88	13	14	13	14
	0.2	55	61	7	8	8	9
	0.25	55	52	8	8	7	8
TCU	0.1	148	128	12	15	20	25
	0.2	148	118	17	15	22	19
	0.25	145	108	10	14	15	20
NRC	0.1	201	144	15	16	24	26
	0.2	192	116	10	12	17	19
	0.25	183	118	9	11	17	22

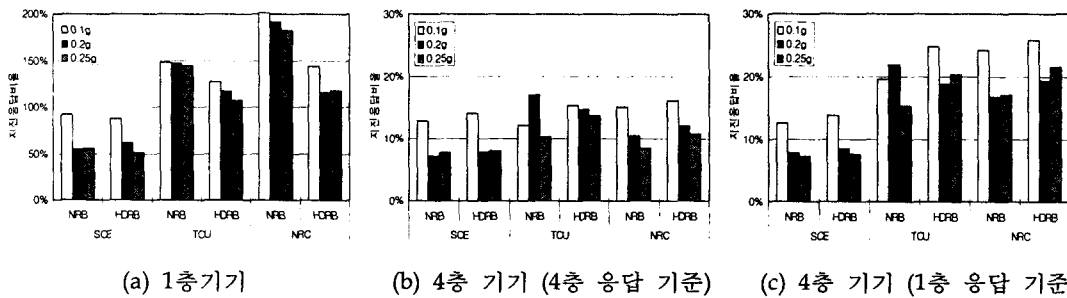


그림 7. 면진장치와 지진파에 따른 지진응답비율

표 2와 그림 7에서 보는 바와 같이 1층 기기의 경우 입력지진이 그대로 입력되는 부분이므로 면진장치의 고유진동수인 0.43초와 각 지진파와의 공진여부에 따라 증폭이 발생되었고 따라서 지진력 저감효과가 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 주목할만한 사실은 NRB와 HDRB와의 지진응답비율이 지진파에 따라 상이하게 발생한다는 것이다. 즉 SCE지진의 경우는 NRB와 HDRB의 지진응답비율이 거의 차이가 나지 않는 반면 NRC지진의 경우는 50%이상의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 앞의 그림 3에서 입력지진파의 응답스펙트럼을 비교한 그래프에서 면진장치의 고유주파수인 0.43초에서의 응답의 크기와 동일한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 즉 면진장치의 공진영역과 탁월주파수대가 일치하는 NRC지진의 경우는 NRB와 HDRB의 지진응답비가 큰 차이를 보임으로서 감쇠에 의한 영향이 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 면진장치의 공진영역과 큰 차이를 보이는 SCE 지진의 경우는 공진영역이 아닌 경우에는 면진장치에 따른 감쇠비의 영향이 거의 지진응답에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 전반적으로 입력 지진의 PGA가 증가할수록 지진력 저감효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4층 기기의 지진응답비율을 비교해 보면 1층 기기와는 상이하게 HDRB의 지진력 저감률이 전반적으로 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 공진영역을 상당히 벗어나 있는 경우 고감쇠고무의 초기강성이 일반천연고무의 초기강성보다 더 크게 작용한 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 SCE지진의 경우는 모든 경우에 면진장치의 공진주파수와와의 차이로 인하여 가장 좋은 지진력 저감률을 보임을 알 수 있다. 그 차이는 구조물의 공진주파수에 의한 영향이 더해져서 1층의 입력력을 기준으로 비교한 지진응답비율(그림 7(c))을 살펴보면 더욱 분명하게 구분이 되는 것을 알 수

있다.

다음으로 표 1에서 제시한 바와 같이 목표지진의 PGA와 실제 진동대 실험시 입력되는 지진의 PGA가 차이가 발생함으로 인하여 실제 PGA에 따른 지진응답비율의 차이를 구분하기 어려우므로 실제 진동대 실험에 구현된 지진파의 PGA를 기준으로 하여 지진파와 면진장치에 따른 응답의 차이를 다음의 그림 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 PGA에 따른 지진응답비율도 전술한 바와 같은 거동을 보이는 것을 알 수 있으며 면진장치와 지진파에 의한 차이가 좀 더 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다.

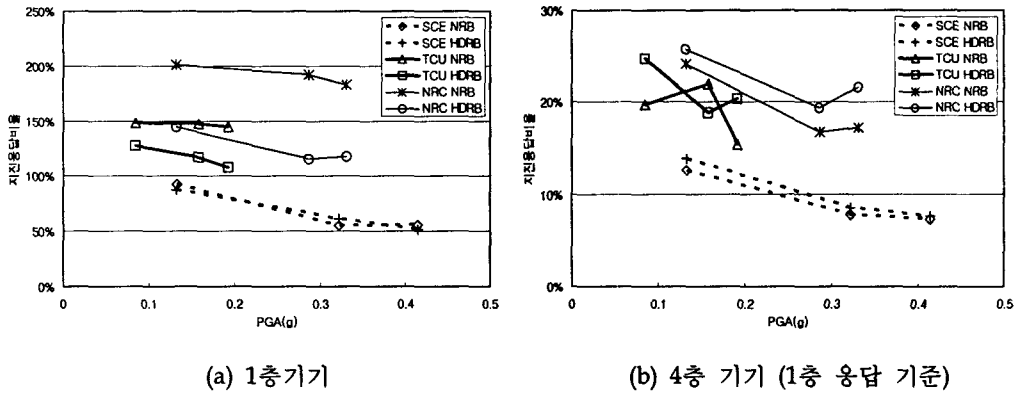


그림 8. PGA에 따른 지진응답비율

### 5.2 응답스펙트럼에 의한 분석

다음에는 1층과 4층에서의 층응답스펙트럼과 각 층에서의 기기에서의 응답스펙트럼을 같이 비교하여 다음의 그림 9 ~그림 11에 도시하였다. 그림 9에서는 SCE지진시 1층과 4층의 응답스펙트럼을 비교하였다. 그림에서 보는 것처럼 1층의 경우 면진장치 자체의 고유주파수 부분인 4Hz 부근에서 증폭이 일어나는 것을 알 수 있다. HDRB의 경우는 고감쇠 특성으로 인하여 고유주파수가 장주기 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 4층기기의 경우에도 동일하게 발생하지만 그 응답이 매우 작으므로 결과에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

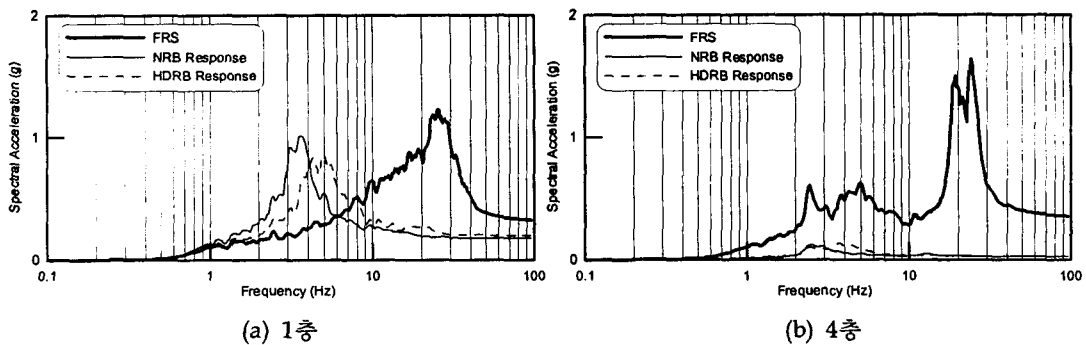


그림 9. SCE 지진의 층별 응답스펙트럼

그림 10에서 제시하고 있는 TCU지진의 경우는 1층에서는 지진파 자체의 증폭에 의해서 1Hz 부분의 증폭이 면진장치에도 그대로 반영된 것을 알 수 있다. 면진장치의 고유주파수 영역에서는 SCE지진의 경우와 유사한 응답특성을 보이는 것을 알 수 있다. 4층의 경우는 FRS에 의한 영향이 감소하고 면진장치 자체의 고유주파수 영역에서만 약간의 증폭이 발생하고 나머지 영역에서는 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.

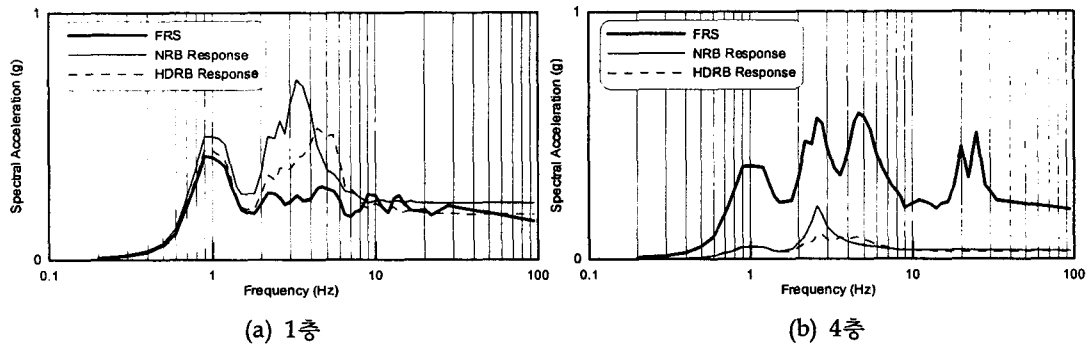


그림 10. TCU 지진의 층별 응답스펙트럼

그림 11에서 제시하고 있는 NRC 지진의 경우는 입력지진파의 탁월주파수대가 광범위한 구간에 퍼져 있으므로 면진장치의 고유주파수에 의한 영향이 가장 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 3층의 경우는 4Hz부근에서 구조물 자체의 고유주파수에 의한 영향을 크게 받고 나머지 구간에서는 감소하므로 전체적으로 응답이 감소되어 있는 것을 알 수 있다.

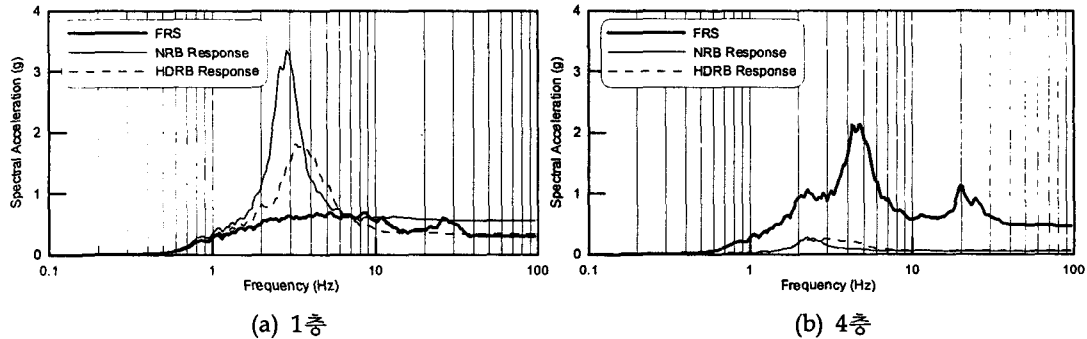


그림 11. NRC 지진의 층별 응답스펙트럼

## 6. 결론

본 연구에서는 천연고무베어링(NRB)과 고감쇠고무베어링(HDRB)을 이용하여 원전격납건물 내부에 존재하는 소규모 기기의 면진효과를 분석하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. NRB와 HDRB를 사용한 기기면진을 위한 진동대 실험결과 두가지 면진장치 모두 기기면진을

위하여 충분한 지진력 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 다만 발생가능한 지진의 주파수 범위와 면진하고자 하는 기기 공진주파수 영역을 세심하게 검토하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

2. 고감쇠고무의 감쇠특성이 면진장치와 지진파가 공진을 일으키는 영역에서는 지진력을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 지진파의 탁월주파수 영역과 일치하지 않는 경우는 고감쇠 특성이 오히려 지진력 저감효과를 저해하는 요인으로 나타나는 것을 알 수 있다.
3. HDRB는 NRB에 비하여 공진영역을 장주파수대로 이동시키며, 첨두값을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 구조물의 공진영역과 중복될 가능성이 있는 경우에는 HDRB를 이용한 면진이 NRB에 비하여 우수한 거동을 보일 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. 전영선, 최인길, 원전기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가, 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.
2. 전영선, 최인길, 기기의 면진을 통한 원전의 내진안전성 향상, 한국지진공학회, 춘계학술발표회, 2003.
3. 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.
4. 전영선, 김민규, 최인길, 김영중, 기기면진을 위한 면진장치의 거동분석실험 (I) : FPS 거동분석, 한국지진공학회, 추계학술발표회, 2003.
5. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
6. Hwang, J.S. and Ku., W, Analytical Modeling of High Damping Rubber Bearings, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 8, August 1997.
7. Watanabe, Y., Kato, A., Somaki, T., Umeki, K., and Sato, N., Shaking Table Test and Analysis on Base Isolated FBR Plant Model with High-Damping Rubber Bearing, 12-WCEE 2000.