

## 원전기기의 내진성능 향상을 위한 면진장치 효율성 평가

### Effectiveness Evaluation of Seismic Isolation Devices for Seismic Capacity Improvement of Nuclear Equipment

김민규, 전영선, 최인길  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구에서는 원전 격납건물에서의 기기면진을 위한 진동대 실험의 분석결과를 제시하고 있다. 기기면진을 위한 면진장치로는 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System: FPS), 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB) 그리고 고감쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였다. 주파수 특성이 다른 3종류의 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하였으며, 최대 지반가속도, 면진장치 감쇠특성, 수평직교방향 2차원 운동, 수직운동의 영향 그리고 주파수 특성등에 따른 면진 기기의 거동을 분석하였다. 결론적으로 면진장치를 이용하여 격납건물 내부 소형기기의 내진성을 향상시킬 수 있음을 보였다.

**주요어** : 기기면진, 원전 격납건물, 진동대 실험, 마찰진자형 베어링(FPS), 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무 베어링(HDRB)

#### 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 Friction Pendulum System (FPS), natural rubber bearing (NRB) and high damping rubber bearing (HDRB) were selected for the isolation. Peak ground acceleration, damping characteristics of isolation system, vertical motion and frequency contents of selected earthquake motions were considered. Finally, it is presented that the FPS, 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, Friction Pendulum System (FPS), Natural Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB)

## 1. 서론

원전에 작용하는 외부사건으로서 원전의 거동에 영향을 미칠 수 있는 것은 크게 화재, 홍수 그리고 지진으로 구분된다. 이 중에서 가장 광범위하게 원전의 거동에 영향을 미칠 수 있는 외부사건은 지진이라고 할 수 있다. 지진으로 인하여 원전이 피해를 입은 사례는 국내외적으로 보고된 바는 없다. 그것은 그만큼 지진에 대비해서 철저한 안전율을 유지할 수 있도록 설계와 시공 및 유지관리가 되고 있는 것을 의미한다. 그러나 지진에 의한 피해가능성은 항상 존재하는 것이며 이에 대한 대비는 간과하여서는 안 되는 것이며, 따라서 격납건물 자체의 내진성능을 향상시키기 위한 노력들이 많이 기울여지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 격납건물 내부의 기기들에 대한 면진을 통하여 기기의 면진효과를 증가시키기 위한 노력의 일환으로 진동대 실험을 통한 면진효과분석을 시도하였다. 격납건물 내부의 기기들이 지진시 손상을 입었을 경우 그에 의한 오작동으로 인하여 노심이 손상을 입고 결과적으로 격납건물에 치명적인 손상이 발생할 가능성은 배제할 수 없는 현실이기 때문이다<sup>[1][2]</sup>. 면진장치로는 마찰진자형 베어링 (Friction Pendulum Bearing: FPS), 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB) 그리고 고감쇠고무베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였다. 진동대 실험을 위한 지진파는 탁월주파수 영역이 상이한 3종류의 지진파를 선정하였다. 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. 목표로 하는 격납건물의 형상은 다음의 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물은 원통형 shell 구조를 가지고 있으며, 직경은 43.6m 이고 돔구조를 제외한 부분의 높이는 48.14m 이다.

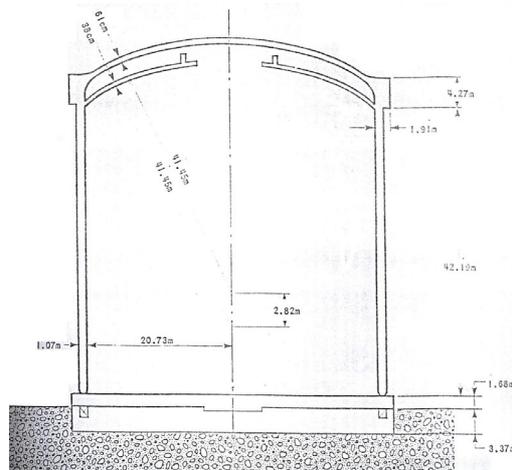


그림 1. 월성 2호기 제원<sup>[3]</sup>

본 실험의 목적은 월성원전 2호기 격납건물을 대상으로 지진과에 따른 격납건물의 응답거동을 분석하고 격납건물내의 기기에 대한 면진장치를 적용할때의 면진효과에 대한 타당성을 분석하는 것이다. 따라서 월성 2호기 격납건물과 동일한 정도의 고유진동수를 갖는 구조물을 선정하여 실험을 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 월성원전 2호기 설계자료를 검토한 결과 각 해석모형에 따른 격납건물의 고유진동수는 표 1에 정리한 바와 같다.

표 1. 월성원전 2호기 격납건물의 고유진동수(Hz)<sup>[3]</sup>

모드		모 형					
		축대칭 모형			3차원 모형		
		연암	보통암	경암	연암	보통암	경암
수평	동-서	3.70	3.96	4.05	3.54	3.74	3.80
	남-북	3.70	3.96	4.05	3.60	3.80	4.20
연직		8.40	8.69	8.75	7.91	8.05	8.08

여기서 격납건물의 해석모형에 따른 고유진동수에 약간의 차이가 발생하는 것은 격납건물의 해석모형에 따른 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. 또한 모형별로 연암, 보통암 그리고 경암 조건에 따라 고유진동수의 차이가 발생하는 것을 의미한다. 따라서 본 진동대 실험을 위한 모형은 고유진동수가 4Hz 정도의 구조물로 설계하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 따라서 높이:폭의 비가 이와 유사한 실험모형을 만들기 위하여 다음 그림 2와 같은 3차원 프레임구조를 선택하였다. 실험대상으로 선택한 모형 구조는 4층으로 이루어진 철골구조로서 기둥의 부재는 강봉을 선택하였고 슬래브는 강판을 사용하도록 하였다. 실험모형은 그림 3에 제시하였다. 또한 기기를 모사하기 위하여 각각 중량 400kg의 강재를 구조물 4층에 면진시킨후 설치하여 기기를 대신하도록 하였다. 실험대상의 제원은 다음의 표 2에 제시하였다.

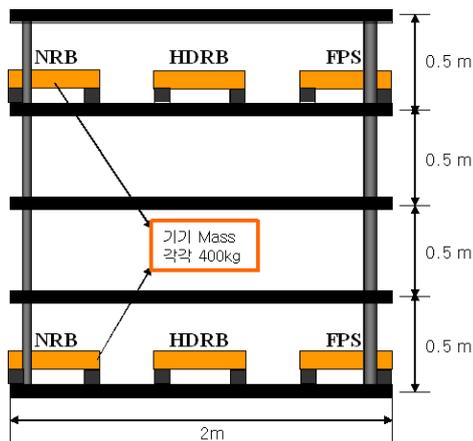


그림 2. 실험모형의 모식도



그림 3. 실험모형

표 2. 실험 모형의 제원

항 목	단 위	제 원
강관기둥	직경	cm
	두께	cm
슬래브	두께	cm

정확한 실험을 위하여 그림 4와 같은 해석모형을 이용하여 일반적으로 널리 사용되는 상용프로그램인 SAP2000<sup>[4]</sup>을 이용하여 대상 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 모드해석결과 계산된 구조물의 모드는 표 3에 정리한 바와 같다. 표 3에서 보는 바와 같이 수치해석결과 제1모드의 고유진동수는 4.47Hz 정도인 것으로 평가되어서 표 1에서의 월성원전 격납건물의 해석결과에 비해 다소 고진동수대에서 공진이 발생하는 것으로 보이나 본 구조물에는 3층에 400kg의 강재가 기기를 대신하여 설치될 것이므로 고유진동수는 감소할 것으로 보인다. 따라서 실험모형으로서 적합한 것으로 판단된다.

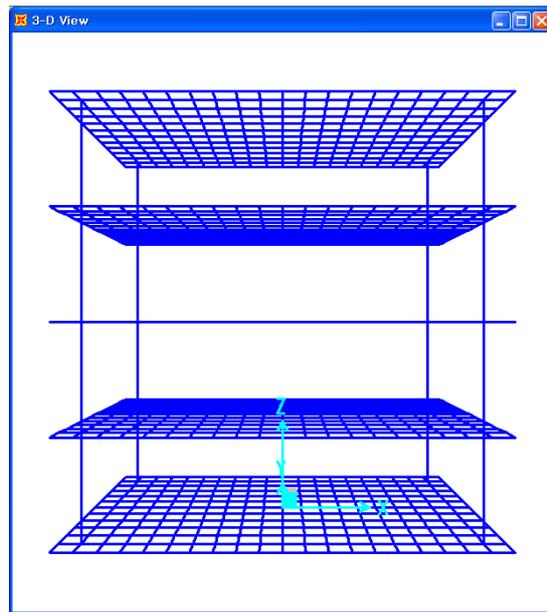


그림 4. 실험대상구조물의 수치해석 모형

표 3. 실험대상구조물의 모드해석 결과

모드	주기(초)	진동수(Hz)
1	0.224	4.474
2	0.076	13.151
3	0.048	20.829

### 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 5에 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. 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 스펙트럼인 NRC<sup>[5]</sup>의 경우 미국 서부에서 발생하는 지진파들을 분석하여 작성된 것이고 실제 원전의 내진설계시 사용하는 응답스펙트럼이므로 이를 이용한 인공지진을 이용하여 실험에 사용하였다. 또한 국내의 지반 및 지질조건을 반영하여 NRC를 수정하여 생성한 인공지진인 SCE 지진을 선택하였으며, TCU 지진의 경우는 가장 최근에 큰 피해를 준 근거리 지진으로서 저진동수 영역이 상당히 증폭되어 있으므로 입력지진으로서 선정하였다.

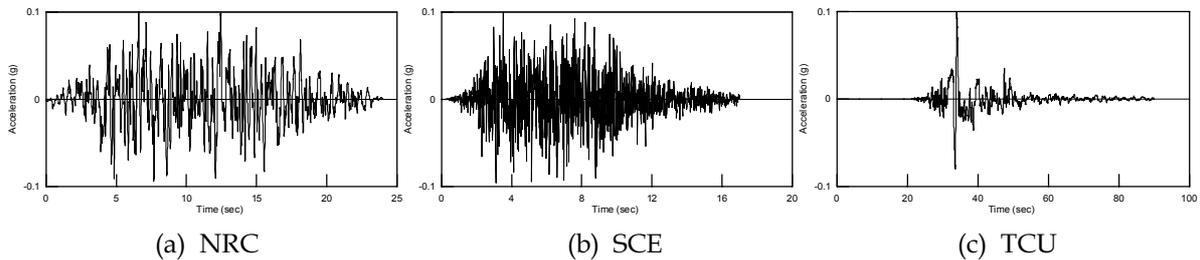


그림 5. 입력지진의 가속도 시간이력

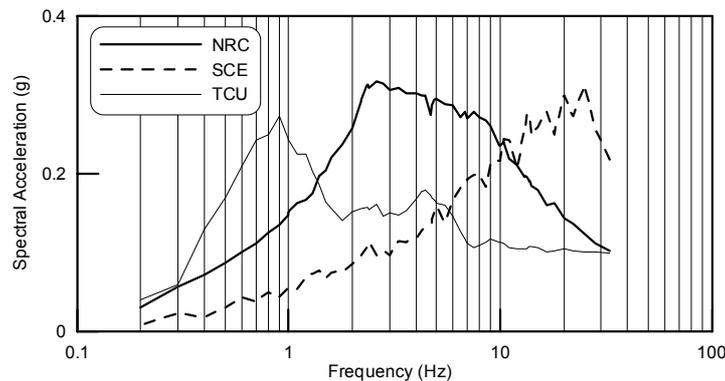


그림 6. 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

## 4. 면진장치의 선정 및 설계

### 4.1 층응답스펙트럼의 산정

기기면진을 위하여 사용되는 면진장치의 설계를 위하여 그림 4의 해석 모형을 이용하여 전술한 입력지진파를 적용하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과 기기가 위치한 4층에서의 응답스펙트럼을 구하였다. 각 지진파에 따른 4층에서의 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum, FRS)은 그림 7에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 층응답스펙트럼은 약 4.5Hz에서 공진주파수대가 형성되고 지진파의 특성에 따라 SCE 지진의 경우는 고주파에서 TCU지진은 저주파에서 약간의 Peak이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 가장 효과적인 면진장치의 설계를 위해서는 0.5Hz 미만의 저주파대에서 공진이 발생하는 면진장치를 설계해야 함을 알 수 있다.

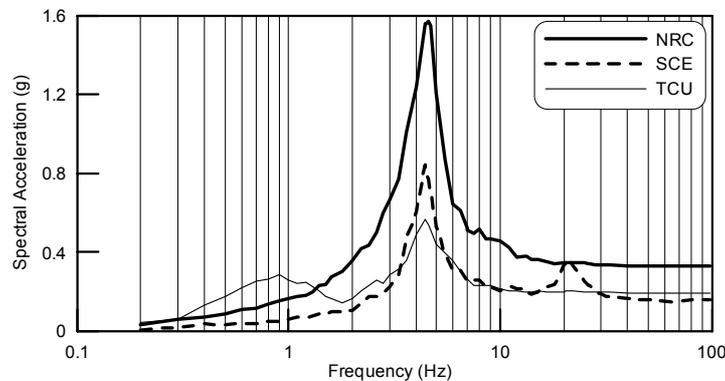
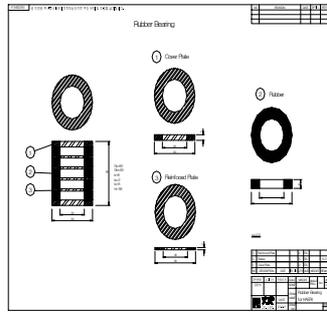


그림 7. 입력지진에 따른 층응답스펙트럼

### 4.2 NRB와 HDRB의 설계

본 실험에서 사용한 고무베어링은 NRB와 HDRB로서 실제로 가장 널리 사용하는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 사용하지 않은 것은 본 연구의 실험대상인 기기의 하중이 400kg으로서 매우 작으므로 LRB를 사용하였을 경우 현실적으로 면진효과를 발휘하는 것이 불가능하기 때문이다. 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 널리 사용하고 있는 면진장치이다<sup>[6]</sup>. 본 실험에서는 NRB와 HDRB의 설계를 위하여 상부하중에 따른 목표 고유진동수를 결정하였다. 전술한 바와 같이 본 연구는 소형 기기를 대상으로 하였으므로 상부의 중량이 400kg이다. 이와 같은 경우 고무베어링의 단면이 커지면 면진효과가 전혀 발생하지 않는 단점이 있다. 따라서 제작가능한 고무베어링중 가장 작은 단면을 선택하여 2.3Hz의 고유진동수를 가지도록 설계하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. 본 실험에 사용된 면진장치의 제원은 그림 8(a)에 제시한 바와 같이 직경 50mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였다. 설계에 따라 제작된 면진장치의 모형은 그

림 8(b)에서 제시한 바와 같다. NRB와 HDRB는 고무만 다른 종류를 사용하였으며 동일한 형상으로 제작하였다.



(a) 제원



(b) 사진

그림 8. 실험에 사용한 NRB와 HDRB

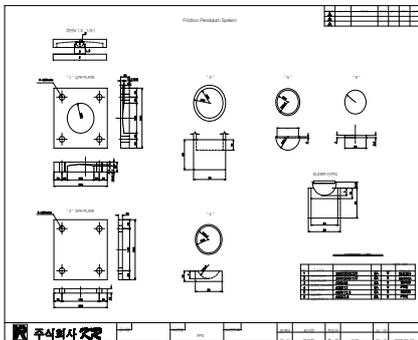
### 4.3 FPS의 설계

본 실험에 적합한 FPS의 고유진동수는 1Hz로 결정하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 1Hz의 고유진동수를 가지는 면진장치의 경우는 TCU의 경우는 큰 면진효과를 발휘하기 어려울 것으로 보이지만 고무베어링의 고유주파수와 너무 큰 차이가 발생하는 것은 실험의 목적과 비추어 바람직하지 않은 것으로 판단되므로 1Hz로 결정하였다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에 의하여 FPS의 반경은 24.8cm로, 수평강성은  $4.02 \text{ kgf/cm}^2$ 로 결정하였다.

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

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

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 결정된 값으로 설계한 FPS의 제원과 제작된 형상은 다음의 그림 9와 같다.



(a) 제원



(b) 사진

그림 9. 실험에 사용한 FPS

## 5. 진동대 실험 및 결과분석

### 5.1 실험순서

본 실험을 위해서 표 4에 정리한 바와 같은 순서로 실험을 진행하였다. 표에서 보는 바와 같이 PGA를 0.1g, 0.2g 그리고 0.25g의 3단계로 수행하였으며, 하나의 PGA에 대한 실험이 끝나면 전체 시스템의 손상여부를 판단하기 위하여 Modal test를 수행하였다. 계측은 가속도계를 이용하였으며 각 층에서 수평 2방향의 가속도를 측정하였고, 기기에서는 3방향의 가속도를 측정하였다. 다만 기기가 설치되어 있는 4층에서는 3방향의 가속도를 측정하여 기기에서의 응답가속도와 비교할 수 있도록 하였다. 실험은 1D, 2D 그리고 3D의 경우에 대하여 모두 수행하였으나 본 논문에서는 1차원 응답만에 의한 분석결과만을 제시하도록 한다.

표 4. 진동대 실험순서

실험순서	Earthquake Motion	PGA(g)	비고
1	Modal Test	-	Frequency check
2	SCE, NRC, TCU	0.1	-
3	Modal Test	-	Frequency check
4	SCE, NRC, TCU	0.2	-
5	Modal Test	-	Frequency check
6	SCE, NRC, TCU	0.25	-
7	Modal Test	-	Frequency check

### 5.2 지진응답비에 따른 분석

지진파에 따른 실험 경우 및 각 계측점에서의 PGA는 표 5에 정리한 바와 같다. 표에서 보는 바와 같이 목표지진과 실제지진과는 많은 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 목표지진을 진동대가 모사하는 과정에서 발생한 것으로 이러한 현상을 반영한 분석을 수행하였다. 실제의 입력운동과 기기가 설치되어 있는 4층에서의 층 응답을 비교해 보면 지진파에 따라서 그 응답이 크게 차이나는 것을 볼 수 있다. 즉 SCE지진의 경우는 구조물에서의 응답이 오히려 입력운동보다 감소한 경우가 발생한 반면 NRC 지진의 경우는 층 응답이 큰 폭으로 증가하는 현상이 발생한 것이다. 이것은 구조물의 고유진동수대가 4Hz 정도이므로 발생한 현상인 것으로 충분히 예측이 가능한 현상이다. 기기에서의 응답을 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 일치하여 크게 증폭하는 경우가 발생한 것이다. 4층에 설치된 기기의 경우는 면진장치 모두 면진효과를 발휘하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 좀더 자세하게 비교해 볼 수 있도록 입력지진대비 면진기기에서의 지진응답비를 산출하여 표 6과 그림 10에 제시하였다.

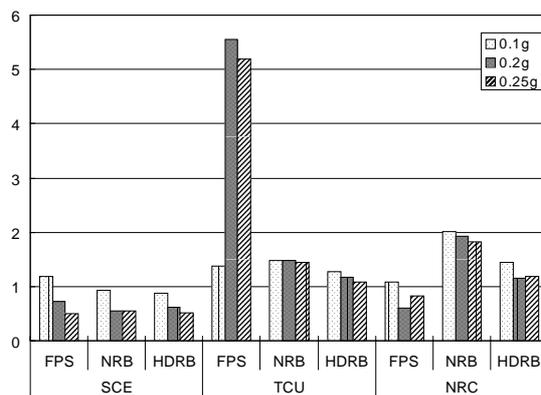
표 5. 기기별 응답 PGA

(단위 : g)

지진파	PGA		1층			4층			
	Target	Real	FPS	NRB	HDRB	층 응답	FPS	NRB	HDRB
SCE	0.1	0.133	0.157	0.123	0.117	0.130	0.176	0.017	0.018
	0.2	0.322	0.232	0.177	0.198	0.352	0.164	0.025	0.028
	0.25	0.414	0.204	0.230	0.213	0.389	0.279	0.030	0.031
TCU	0.1	0.085	0.116	0.126	0.108	0.136	0.127	0.017	0.021
	0.2	0.158	0.876	0.233	0.185	0.202	0.213	0.035	0.030
	0.25	0.192	0.997	0.278	0.207	0.285	0.303	0.029	0.039
NRC	0.1	0.132	0.143	0.266	0.191	0.210	0.139	0.032	0.034
	0.2	0.287	0.175	0.550	0.333	0.459	0.236	0.048	0.056
	0.25	0.331	0.274	0.605	0.391	0.663	0.398	0.057	0.072

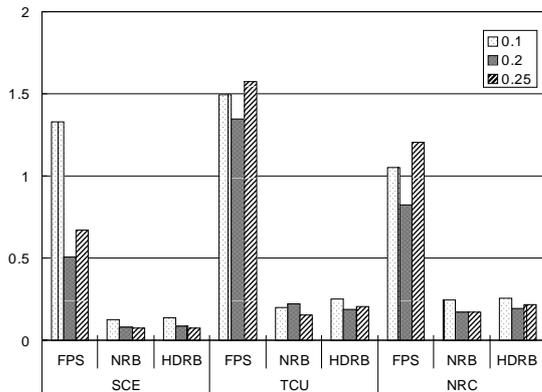
표 6. 기기별 지진응답비

지진파	Target PGA	1층			4층기기 (1층응답 기준)			4층기기 (4층 응답기준)		
		FPS	NRB	HDRB	FPS	NRB	HDRB	FPS	NRB	HDRB
SCE	0.1	1.185	0.926	0.879	1.329	0.126	0.139	1.358	0.129	0.142
	0.2	0.721	0.550	0.615	0.508	0.078	0.085	0.466	0.072	0.078
	0.25	0.493	0.555	0.515	0.673	0.073	0.076	0.716	0.077	0.081
TCU	0.1	1.371	1.482	1.277	1.495	0.197	0.247	0.930	0.123	0.154
	0.2	5.555	1.475	1.176	1.349	0.220	0.189	1.050	0.171	0.147
	0.25	5.189	1.448	1.078	1.576	0.153	0.204	1.064	0.104	0.137
NRC	0.1	1.083	2.015	1.445	1.051	0.242	0.258	0.659	0.152	0.162
	0.2	0.610	1.918	1.160	0.823	0.168	0.194	0.514	0.105	0.121
	0.25	0.829	1.826	1.182	1.203	0.172	0.216	0.601	0.086	0.108

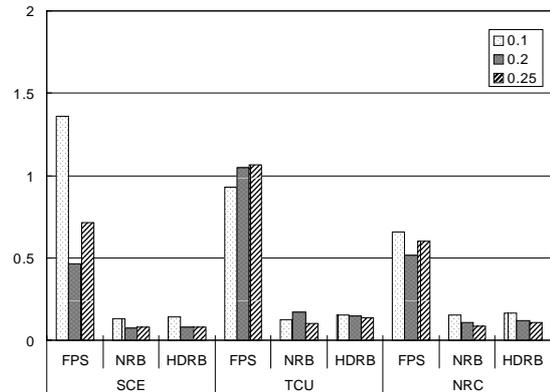


(a) 1층기기

그림 10. 먼진장치와 지진파에 따른 지진응답비율(계속)



(b) 4층 기기 (4층 응답 기준)



(c) 4층 기기 (1층 응답 기준)

그림 10. 면진장치와 지진파에 따른 지진응답비율

표와 그림에서 보는 바와 같이 1층 기기의 경우 입력지진이 그대로 입력되는 부분이므로 면진 장치의 고유진동수인 2.3Hz와 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 그림 5에서 입력지진파의 응답스펙트럼을 비교한 그래프에서 면진장치의 고유진동수인 2.3Hz에서의 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 입력지진의 PGA가 증가할수록 지진력 저감효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. FPS의 경우는 고무베어링과 상이한 결과를 보이고 있는데 SCE지진과 NRC 지진의 경우는 고무베어링과 유사한 거동을 보이는 반면 TCU지진의 경우는 목표지진이 0.2g와 0.25g인 경우 큰 값으로 증폭하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 TCU지진은 저주파수영역에서 탁월주파수가 형성이 되며 변위성분이 큰 지진이므로 FPS에서 큰 변위가 발생하여 변위한계를 넘어서서 충돌이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 FPS의 경우는 사전해석을 통한 최대변위의 검토를 통해서 정확하게 설계하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

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 고유진동수와와의 차이로 인하여 가장 좋은 지진력

저감률을 보임을 알 수 있다. 그 차이는 구조물의 고유진동수에 의한 영향이 더해져서 1층의 입력력을 기준으로 비교한 지진응답비율을 살펴보면 더욱 분명하게 구분이 되는 것을 알 수 있다. FPS의 경우는 전반적으로 고무베어링에 비하여 면진효과가 적은 것으로 나타났다.

### 5.2 응답스펙트럼에 의한 분석

다음에는 목표지진이 0.2g인 경우 1층과 4층에서의 층응답스펙트럼과 각 층에서의 기기에서의 응답스펙트럼을 같이 비교하여 그림 11 ~ 그림 13에 도시하였다. 그림 11에서는 SCE지진시 1층과 4층의 응답스펙트럼을 비교하였다. 1층의 경우 NRB와 HDRB는 면진장치의 특성에 따라 4Hz 부근에서 증폭이 일어나는 것을 알 수 있다. 특히 이 경우에는 NRB의 응답이 HDRB의 응답에 비하여 크게 평가되고 고유진동수는 작게 평가되는 것을 알 수 있다. 고무의 감쇠특성이 공진이 발생하는 부분에서 응답의 크기를 감소시킨 반면 고유진동수를 고주파 영역으로 이동시킨 것으로 판단된다. 반면 FPS의 경우는 입력지진과 유사한 거동을 하는 것을 알 수 있다. FPS는 입력하중의 속도성분에 크게 따라서 응답특성이 달라지므로 SCE지진과 같이 고주파성분이 강하여 변위성분이 약한 경우는 면진장치로서의 특성을 발휘하지 못하는 것으로 판단된다.

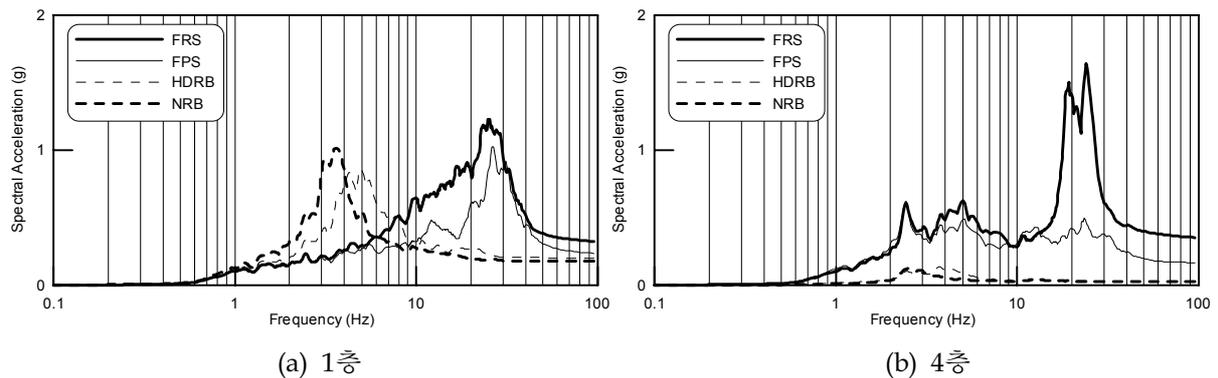


그림 11. SCE 지진의 층별 응답스펙트럼

그림 12에서 제시하고 있는 TCU지진의 경우는 1층에서는 지진과 자체의 증폭에 의해서 1Hz 부분의 증폭이 고무베어링에도 그대로 반영된 것을 알 수 있다. 면진장치의 고유진동수 영역에서는 SCE지진의 경우와 유사한 응답특성을 보이는 것을 알 수 있다. 4층의 경우는 FRS에 의한 영향이 감소하고 면진장치 자체의 고유진동수 영역에서만 약간의 증폭이 발생하고 나머지 영역에서는 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. FPS의 경우 저진동수 부분에서는 FRS와 유사한 거동을 보이는 것은 SCE지진의 경우와 유사하게 입력운동과 동일한 거동을 보이는 것으로 보이나 고진동수 부근에서 커다란 증폭을 보이는 것은 FPS의 변위허용치를 초과한 거동이 발생하여 slider가 변위제어판에 충돌하므로써 큰 가속도가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 거동은 후에 FPS로 면진된 기기의 변위를 분석하므로써 좀 더 자세히 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 4층의 경우에도

FPS는 면진특성을 효과적으로 발휘하지 못하고 있는 것으로 판단된다.

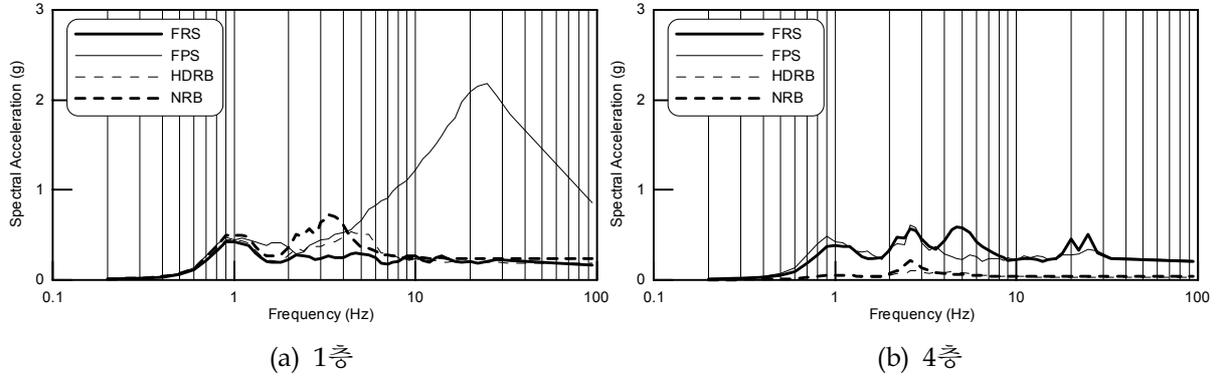


그림 12. TCU 지진의 층별 응답스펙트럼

그림 13에서 제시하고 있는 NRC 지진의 경우는 입력지진파의 탁월주파수대가 광범위한 구간에 퍼져 있으므로 면진장치의 고유진동수에 의한 영향이 가장 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 다른 지진과 다르게 NRC지진의 경우는 1층에서 FPS의 지진력 저감이 우수한 것으로 나타났다. 고무베어링의 경우는 베어링 자체의 공진영역인 4Hz 부근에서 크게 증폭하는 것을 알 수 있다. 반면 4층의 경우는 4Hz부근에서 구조물 자체의 고유진동수에 의한 영향을 크게 받고 나머지 구간에서는 감소하므로 전체적으로 응답이 감소되어 있는 것을 알 수 있다. FPS의 경우에도 다른 지진과의 경우에 비하여 상대적으로 면진효과가 있는 것으로 나타났다.

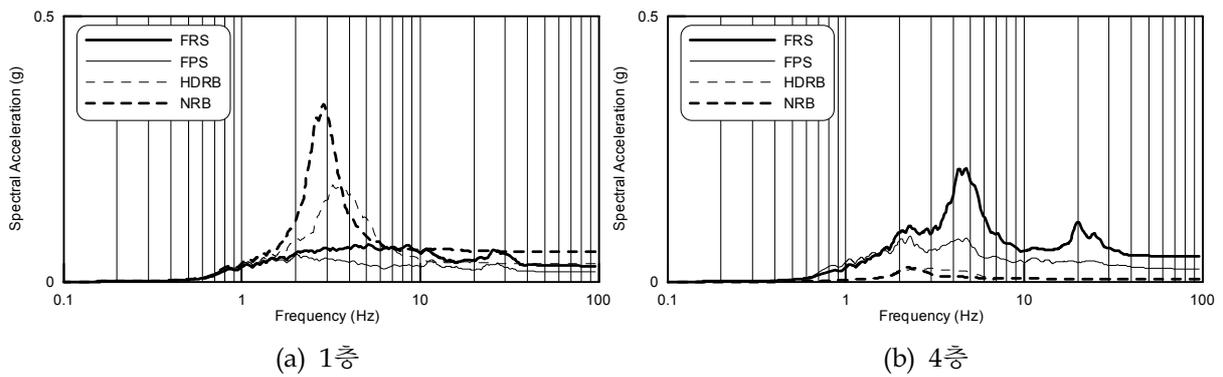


그림 13. NRC 지진의 층별 응답스펙트럼

## 6. 결론

본 연구에서는 마찰진자형 베어링(FPS)과 천연고무 베어링(NRB) 및 고감쇠고무 베어링(HDRB)의 3종류의 면진장치를 이용하여 원전격납건물 내부에 설치된 소규모 기기의 면진효과를 분석하

기 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 고유진동수 그리고 면진기기의 구조물내의 위치에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으므로 이러한 영향을 세심하게 검토하여 설계하는 것이 필요한 것으로 판단된다.
2. 고감쇠고무의 감쇠특성이 면진장치와 지진파가 공진을 일으키는 영역에서는 지진력을 크게 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.
3. FPS의 경우는 전반적으로는 주파수 영역에 크게 영향을 받지 않고 지진력 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 면진효과는 고무베어링에 비하여 상대적으로 작으며, 지진력이 증가할 경우에는 변위한계의 결정이 지진력저감에 중요한 요소임을 알 수 있었다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 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. SAP2000, Computers and Structures, Inc., 1998.
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.