

원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 II : FPS

A Shaking Table Test for Equipment Isolation in the NPP (II): FPS

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

국문요약

본 연구에서는 원전기기의 내진안전성을 증대시키기 위해 면진장치를 적용한 기기의 진동대 실험을 수행하였다. 원전구조물과 유사한 진동수 특성을 가지는 실험 모형을 제작하여 실험에 사용하였으며 구조물 내부의 기기를 모형화 하기 위하여 400kg의 강체를 사용하였다. 마찰진자형 베어링(FPS)을 이용하여 3종류 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하였다. 면진장치로는 마찰진자형 베어링(FPS)을 사용하였다. 입력지진의 최대가속도를 0.1g, 0.2g, 0.25g의 3단계로 변화시키면서 실험을 수행하였고 또한 1방향, 2방향 및 3방향 가진에 의한 거동을 분석하였다. 실험결과 지진파의 연직성분이 FPS의 면진성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 필스타임의 속도성분이 큰 근거리 지진인 경우 면진효과가 감소하는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 원전기기, 면진장치, 내진안전성, 마찰진자형베어링

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 purpose of this study is enhancement of seismic safety of equipment in the Nuclear Power Plant. The isolation system, known as Friction Pendulum System (FPS), combines the concepts of sliding bearings and pendulum motion was selected. Peak ground acceleration, bidirectional motion, effect of vertical motion and frequency contents of selected earthquake motions were considered. As a result, these are founded that the vertical motion of seismic wave affect to the base isolation and the isolation effect decreased in case of near fault earthquake motion.

Key words : nuclear equipment, base isolation system, seismic safety, friction pendulum system

1. 서 론

본 연구에서는 원전에 설치되어 있는 안전관련 기기의 내진성능 향상을 통해서 원전 전체의 안전성을 향상시키기 위한 연구의 일환으로서 면진장치를 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 원전에 사용하는 기기들은 설계지진에 대한 충분한 내진여유도를 가지고 제작하여 내진검증을 거친후에 사용되는 것이 일반적이다. 그러나 설계지진을 초과하는 지진이 발생할 경우에 기기의 손상으로 인한 전체 시스템의 영향은 간과할 수 없는 실정이며 또한 기기의 내진성능 향상을 통해서 원전의 노심손상빈도를 효과적으로 저감시킬 수 있다는 연구결과가 제시된 바 있다.⁽¹⁾

본 연구에서는 기기면진을 위한 면진장치로서 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System: FPS)을 선택하였다. 일반 구조물에는 Coil Spring을 비롯하여 여러종류의 고무베어링 등 구조물의 규모와 목적 및 발생가능 지진파에 따라 다양한 면진장치들이 사용가능하지만 특별히 FPS의 경우는 상부 하중의 크기에 관계없이 일정한 진동수를 유지할 수 있는 장점이 있으므로 구조물에 비하여 자중이

가벼운 기기의 면진에 적합하다. 실제로 1999년 터키의 Izmit 지진 발생시 많은 전력계통 기기들이 손상을 입어 그 후 Saadeghvaziri 등⁽²⁾은 FPS로 면진한 변압기에 대한 실험과 해석적인 연구를 수행한 바 있다.

실험을 위하여 원전 격납건물과 유사한 고유진동수를 가지는 구조물모형을 제작하였으며, 강체 불력을 이용하여 구조물 내부의 기기를 모형화 하였다. 진동대 실험을 위한 입력지진으로 3종의 지진파를 선정하였다. 선정된 지진파는 1999년 대만에서 발생한 Chi-Chi 지진시 제작된 실제 근거리 지진 기록과 우리나라원전부지의 확률론적 지진해해도에 근거한 시나리오 지진파 그리고 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60⁽³⁾의 표준응답 스펙트럼을 사용하여 작성된 지진파이다. 구조물의 바닥층과 중간층에 면진된 기기를 설치하여 PGA(Peak Ground Acceleration)를 증가시키면서 3종의 지진파로 가진하여 각 층과 기기에서의 가속도를 측정하였다.

2. 마찰진자형 베어링(FPS)

본 실험에서 사용한 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 기

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

** 정회원 · 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재해 드립니다.
(논문접수일 : 2004. 8. 2 / 심사종료일 : 2004. 9. 2)

기를 대상으로 한 면진에는 적용이 용이하다. FPS에 대한 연구는 1990년 Zayas 등⁽⁴⁾에 의하여 시작되어 외국의 경우에는 구조물에 적용한 사례도 많이 보고되고 있다. 전술한 바와 같이 Saadeghvaziri 등⁽²⁾은 변압기와 같은 전력계통의 시설물에 FPS와 Hybrid system을 적용하여 면진효과를 검토하였다. 유사한 연구로 Ersoy 등⁽⁵⁾은 FPS에 대한 해석기법을 개발하여 다양한 수치해석을 통하여 적용성을 검토한 바 있다. 그러나 국내의 경우 구조물에 적용된 것은 없고 현재 발전시설, 원전시설 및 교량등에 대한 적용성이 검토되고 있는 단계이다. 기계적 특성에 관해서는 김영중 등⁽⁶⁾과 이정진 등⁽⁸⁾이 실험에 의하여 분석을 수행하였고, 최근에는 김대곤 등⁽⁸⁾이 FPS를 이용하여 원전 주 제어실의 면진에 관한 해석적인 연구를 수행한 바 있다. 교량에 대한 적용성을 분석하기 위하여 오순택 등⁽⁹⁾은 교량에 설치된 FPS의 지진시 거동을 실험 및 해석적으로 평가하였고, 고현무 등⁽¹⁰⁾은 FPS의 최적인자결정에 대한 연구를 수행하여 실제의 적용성을 높일 수 있도록 한 바 있다. 국내의 경우 실제로 구조물에 적용할 수 있는 수준의 내구성을 가지고 있는 FPS의 제작이 현실적으로 어려운 상황에 있으므로 구

조를 또는 기기에 적용하기 위해서는 다양한 실험 및 해석적인 연구를 통하여 많은 자료를 확보하여야 할 것으로 판단된다.

3. 진동대 실험 개요

3.1 실험대상 구조물 및 입력지진

본 연구에서는 원성원전 격납건물을 목표로 하여 구조물모형을 설계 제작하였다. 구조물모형에 대한 자세한 제원은 (I)편⁽¹¹⁾에서 제시하였다. 본 연구에서 사용한 입력지진도 (I)편⁽¹¹⁾에서 제시한 것과 동일한 세가지 지진파를 이용하여 진동대 실험을 수행하였다. 다만 고무베어링과 달리 FPS의 경우는 연직지진력에 의해 면진장치의 면진효과가 달라지므로 수평적교방향 성분과 연직성분의 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼을 모두 비교하여 다음의 그림 1-4에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 NRC 지진 및 Scenario 지진의 경우는 연직방향 지진력을 수평방향 지진력의 2/3가 되도록 설정하였다. TCU052지진의 경우는 실제 계측된 기록의 비율 그대로 조정하여 사용하였다.

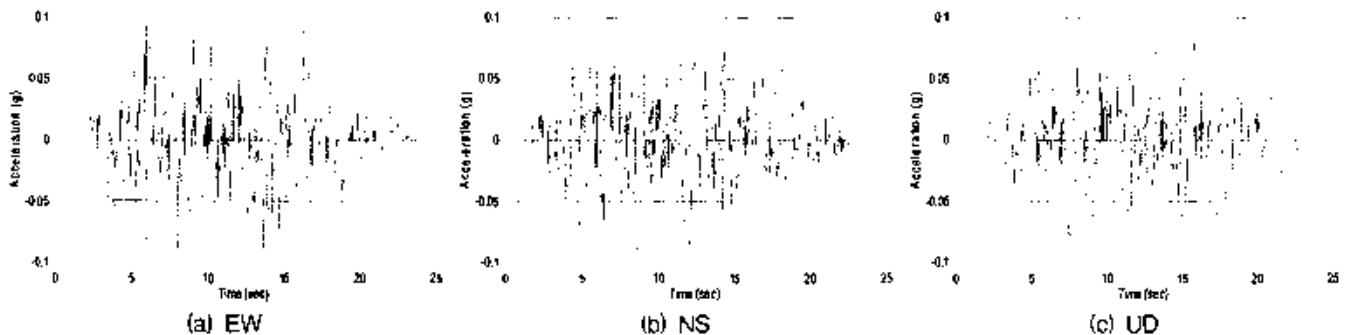


그림 1 NRC 입력지진의 가속도 시간이력

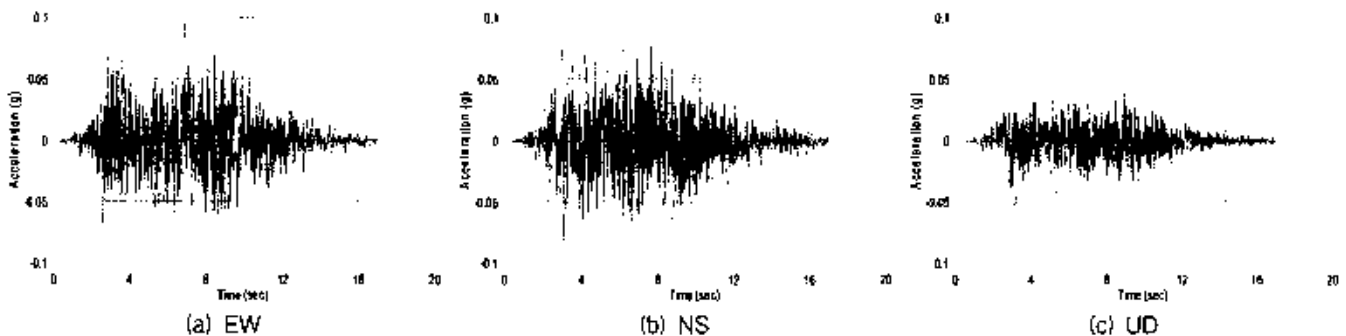


그림 2 Scenario 입력지진의 가속도 시간이력

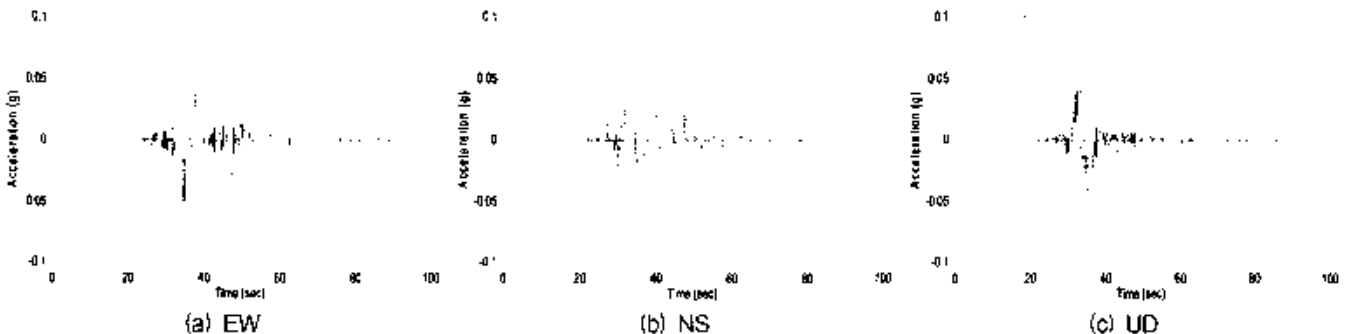


그림 3 TCU052 입력지진의 가속도 시간이력

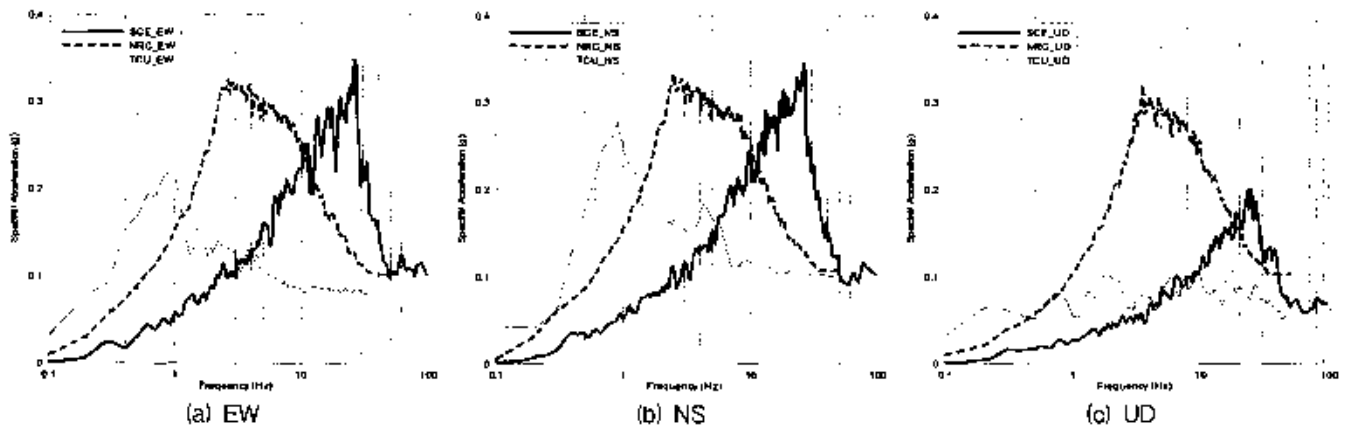


그림 4 입력지진의 가속도 응답스펙트럼

3.2 면진장치의 설계

본 실험에 적합한 FPS의 고유주파수는 1Hz로 결정하였다. 이것은 고무계 베어링의 고유진동수와 차이가 클 경우 응답특성을 비교하는데 어려움이 있을 것으로 판단하여 결정한 것이다. 따라서 다음 식 (1)과 (2)에 의하여 FPS 마찰면의 곡률반경은 24.8cm로, 수평강성은 4.02 kgf/cm²로 결정하였다.

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

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

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률반경, g는 중력 가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 본 실험에 사용한 FPS는 마찰면의 곡률반경이 일반적인 FPS에 비하여 상대적으로 작아 마찰력 뿐 아니라 곡면에 의한 수평분력이 비교적 크게 발생한다. 제작을 위한 도면은 그림 5에 제시하였고 제작된 FPS의 형상은 그림 6과 같다.

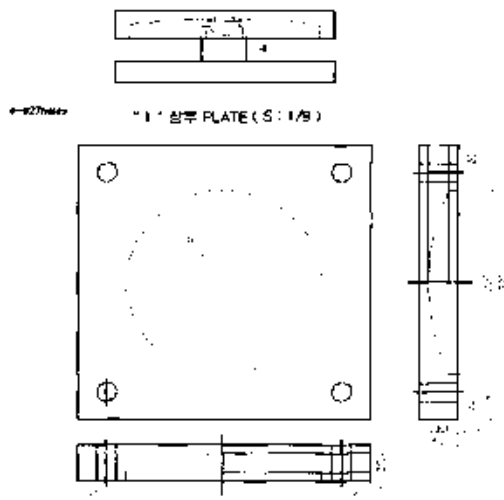


그림 5 FPS 제작도면



그림 6 실험에 사용한 FPS

3.3 면진장치 특성시험

(I)편⁽¹¹⁾과 동일한 실험장치를 이용하여 FPS의 특성시험을 수행하였다. FPS의 경우 고무베어링과는 달리 가진주파수에 의하여 면진장치의 기계적특성이 변화하는 것이 아니고 가진 속도에 의하여 달라지므로 최대변위를 일정하게 한 상태에서 속도를 변화시키면서 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 변화시키면서 실험을 수행하였다. 각 실험 경우별로 실험방법은 다음의 표 1에 정리하였다. 표에서 Case 4의 경우는 다른 경우와 달리 속도를 일정하게 하여 최대변위를 변화시키면서 실험을 수행한 것은 실험장치의 특성상 가진속도가 증가하면 일정한 수직하중을 유지하는 것이 어렵기 때문에 FPS의 손상이 발생할 것을 우려하여 실험순서를 결정하였기 때문이다.

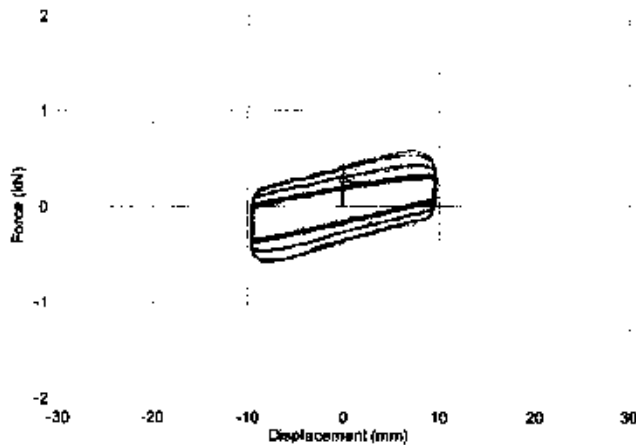
표에서 제시한 것과 같은 실험방법에 의하여 실험을 수행하여 각 Case에 따른 FPS의 하중-변위 이력곡선을 그림 7에 모두 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각 경우별로 속도가 증가함에 따라 이력곡선의 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 7(a)의 경우는 최대변위를 10mm로 고정하고 속도를 증가시키면서 실험을 수행한 것으로 일반

표 1 FPS의 특성시험 방법

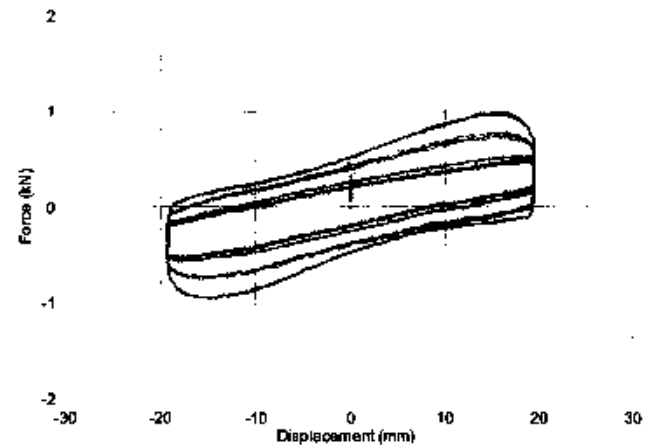
시험경우	변위 (mm)	주파수(Hz)	주기(초)	속도(mm/sec)	Cycle
Case 1	10	0.05	20	2	5
		0.1	10	4	10
		0.5	2	20	10
		1	1	40	10
Case 2	20	0.025	40	2	5
		0.05	20	4	5
		0.25	4	20	10
		0.5	2	40	10
Case 3	30	0.0167	60	2	5
		0.033	30	4	5
		0.167	6	20	10
		0.333	3	40	10
Case 4	10	2	0.5	80	10
	20	1	1	80	10
	30	0.667	1.5	80	10

적인 FPS의 특성시험결과와 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 그림 7(b)부터는 변위가 증가함에 따라 수평 하중이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상

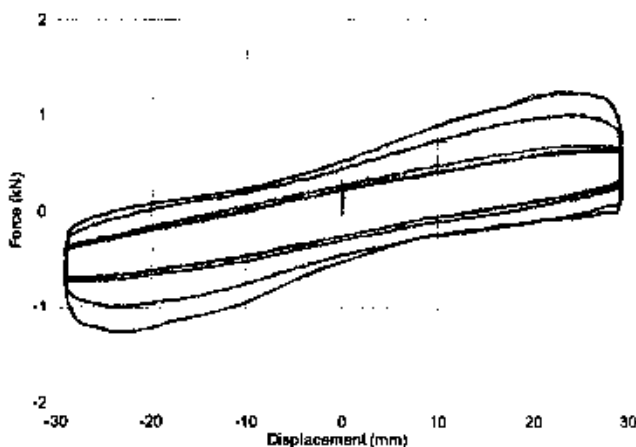
은 속도가 작거나 변위가 작은 경우에는 발생하지 않지만 변위가 20mm이상이고 속도가 20mm/sec가 넘어설 경우 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 것은 두가지 원인에 기인한 것으로 볼 수 있다. 첫 번째는 본 실험에서 사용한 FPS는 일반 구조물에 사용하는 것과 달리 마찰면의 곡률반경이 24.8cm로서 매우 작은 값을 가진다. 따라서 변위가 증가할 경우 마찰면에서의 횡방향 분력이 크게 증가하므로 마찰면에 의한 저항력에 비하여 수평력이 커지게 된다. 두 번째 이유로 본 실험에서는 상재하중을 400kg으로 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 7(d)의 경우 가장 명확하게 볼 수 있다. 그림 7(d)의 경우는 속도를 80mm/sec으로 고정하고 변위를 10mm, 20mm, 그리고 30mm로 증가시키면서 실험을 수행한 경우이다. 따라서 일반적인 FPS에서 볼 수 없는 하중-변위 곡선 형상이 나타나게 된 것으로 판단되며, 곡률반경이 작은 FPS의 설계와 해석에 있어서는 이러한 영향을 고려하여야 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



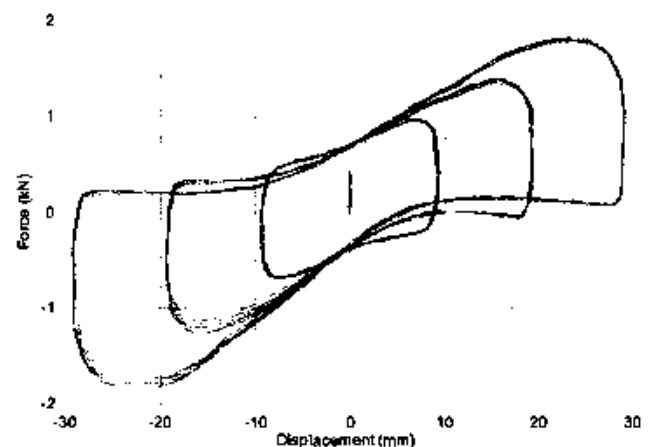
(a) 최대변위 10mm



(b) 최대변위 20mm



(c) 최대변위 30mm



(d) 속도 80mm/sec

그림 7 FPS의 하중-변위이력

4. 실험결과 및 분석

실험의 방법과 횟수는 (I)편⁽¹¹⁾에서 기술한 것과 동일하게 수행하였으나 FPS의 특성상 연직지진력에 의하여 면진 효과가 변화하는 것에 초점을 맞추어 분석을 수행하였다.

4.1 최대가속도응답 분석

먼저 목표로 설정한 PGA에 따라 실제로 진동대에 입력된 지진파의 PGA와 그에 따른 각 기기에서의 최대가속도 응답을 표 2에 정리하였다.

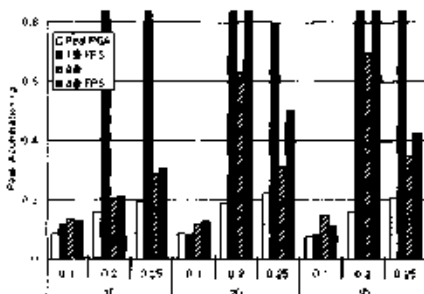
표 2에서 보는 바와 같이 입력지진과 구조물에서의 응답 값을 비교해 보면 각 지진파별로 구조물에서의 증폭이 다

르게 나타나는 것을 확연히 알 수 있다. 이것은 구조물의 고유진동수와 입력지진파의 탁월주파수 영역과의 관계에 의해서 나타나는 현상이다. 또한 지진파에 따라 FPS에 의한 면진효과도 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 지진입력과 기기에서의 응답을 좀 더 효과적으로 비교해 보기 위하여 x방향의 경우에 대하여 진동대의 실제 입력지진과 1층 기기의 응답, 4층에서의 층응답 그리고 4층에 설치되어 있는 기기의 응답에서 최대가속도를 지진파별로 다음의 그림 8에서 표시하였다.

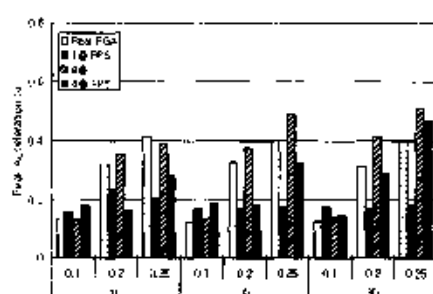
그림 8에서 입력지진에 의한 구조물에서의 증폭과 그에 따른 면진기기에서의 면진효과를 쉽게 알 수 있다. Scenario 지진의 경우를 보면 몇가지 경우를 제외하면 입력지진에 비해서 지진력이 감소되는 것을 알 수 있다. 목표지진이

표 2 구조물 및 면진기기의 최대가속도 응답

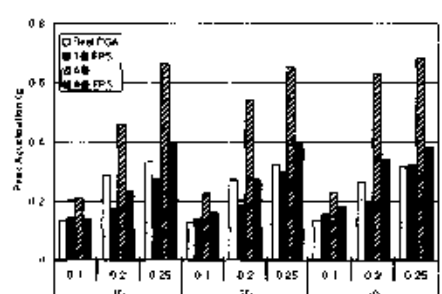
지진파	차원	Target PGA			Real PGA			1층 FPS			4층 응답			4층 FPS		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D	0.1	-	-	0.133	-	-	0.157	-	-	0.130	-	-	0.176	-	-
		0.2	-	-	0.322	-	-	0.232	-	-	0.362	-	-	0.164	-	-
		0.25	-	-	0.414	-	-	0.204	-	-	0.389	-	-	0.279	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.121	0.139	-	0.169	0.162	-	0.134	0.238	-	0.185	0.193	-
		0.2	0.2	-	0.326	0.302	-	0.167	0.165	-	0.373	0.372	-	0.181	0.167	-
		0.25	0.25	-	0.399	0.391	-	0.174	0.226	-	0.488	0.590	-	0.324	0.363	-
	3D	0.1	0.1	0.067	0.125	0.126	0.081	0.174	0.135	0.100	0.140	0.242	0.131	0.147	0.143	0.343
		0.2	0.2	0.134	0.311	0.305	0.215	0.164	0.181	0.255	0.413	0.543	0.339	0.288	0.270	0.922
		0.25	0.25	0.201	0.395	0.396	0.292	0.179	0.222	0.345	0.511	0.724	0.449	0.470	0.410	1.203
TCU052	1D	0.1	-	-	0.085	-	-	0.116	-	-	0.136	-	-	0.127	-	-
		0.2	-	-	0.158	-	-	0.876	-	-	0.202	-	-	0.213	-	-
		0.25	-	-	0.192	-	-	0.997	-	-	0.285	-	-	0.303	-	-
	2D	0.1	0.08	-	0.084	0.096	-	0.082	0.075	-	0.116	0.148	-	0.125	0.116	-
		0.2	0.16	-	0.187	0.109	-	1.257	0.849	-	0.628	0.634	-	0.989	0.630	-
		0.25	0.2	-	0.222	0.137	-	0.798	0.729	-	0.311	0.307	-	0.503	0.346	-
	3D	0.1	0.08	0.044	0.076	0.095	0.056	0.083	0.104	0.057	0.146	0.159	0.076	0.110	0.138	0.098
		0.2	0.16	0.088	0.159	0.115	0.103	1.124	0.624	0.360	0.693	0.575	0.133	0.905	0.584	0.562
		0.25	0.2	0.11	0.208	0.132	0.135	0.884	0.552	0.229	0.346	0.294	0.161	0.425	0.299	0.303
NRC	1D	0.1	-	-	0.132	-	-	0.143	-	-	0.210	-	-	0.139	-	-
		0.2	-	-	0.287	-	-	0.175	-	-	0.459	-	-	0.236	-	-
		0.25	-	-	0.331	-	-	0.274	-	-	0.663	-	-	0.398	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.127	0.203	-	0.142	0.169	-	0.227	0.390	-	0.162	0.180	-
		0.2	0.2	-	0.272	0.322	-	0.188	0.201	-	0.538	0.735	-	0.271	0.313	-
		0.25	0.25	-	0.323	0.378	-	0.298	0.292	-	0.653	0.863	-	0.402	0.432	-
	3D	0.1	0.1	0.1	0.134	0.187	0.122	0.154	0.153	0.133	0.229	0.381	0.141	0.180	0.176	0.185
		0.2	0.2	0.2	0.264	0.309	0.244	0.195	0.201	0.262	0.632	0.707	0.267	0.338	0.357	0.405
		0.25	0.25	0.25	0.314	0.376	0.312	0.321	0.306	0.340	0.683	0.791	0.322	0.381	0.436	0.511



(a) Scenario



(b) TCU052



(c) NRC

그림 8 진동대 실험에 의한 응답최대가속도

0.1g인 경우는 지진력 저감효과가 거의 없는 것으로 나타나는 것은 상대적으로 작은 지진력에서는 FPS의 초기강성으로 인하여 면진효과를 발휘하지 못하는 것으로 판단된다. 이와 유사한 경향은 NRC 지진에서도 동일하게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 반면 TCU052의 경우는 면진효과가 거의 발생하지 않고 오히려 FPS를 사용한 면진으로 지진력이 증폭되는 것을 알 수 있다. 또한 0.2g 이상의 지진에서는 지진력이 과도하게 증폭이 되는 것을 알 수 있다. 이에 대한 부분은 4.1.2절에서 분석하였다.

4.1.1 입력지진분석

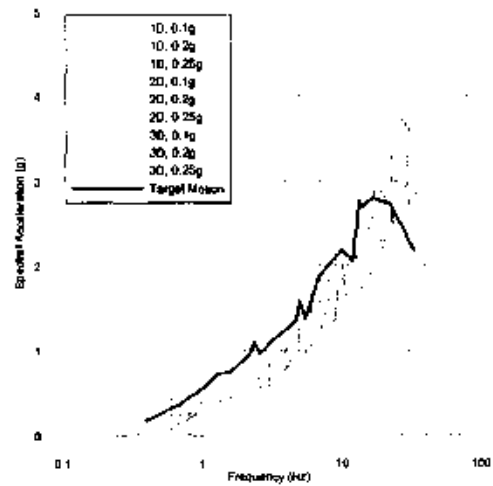
표에서 보는 바와 같이 실제로 목표로 한 지진동을 정확하게 진동대에서 구현하는 일은 쉽지 않은 일이다. 최대가속도 뿐만 아니라 지진파형을 그대로 구현하는 일도 현실적으로 쉽지 않은 일이다. 따라서 본 절에서는 목표로 하였던 지진파와 실제 진동대가 구현한 지진파를 비교하여 그 차이를 분석해 보고자 한다. 우선 목표로 했던 PGA와 실제 진동대에서 계측된 PGA를 비교하여 표 3에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 전체적으로 Scenario 지진과 NRC 지진의 경우는 목표로 설정한 PGA보다 큰 값의 PGA를 갖는 지진파가 입력된 것을 알 수 있다. 반면 TCU052지진의 경우는 목표지진보다 작은 크기의 지진파가 입력된 것을 알 수 있다. 이것은 TCU052지진의 경우 저주파 성분이 강하며 탁월주파수대가 1Hz 부근이므로 진동대가 모사하기에 어려움이 있었을 것으로 판단된다.

표 3 목표지진과 실제 입력된 지진의 PGA 비교 (단위:g)

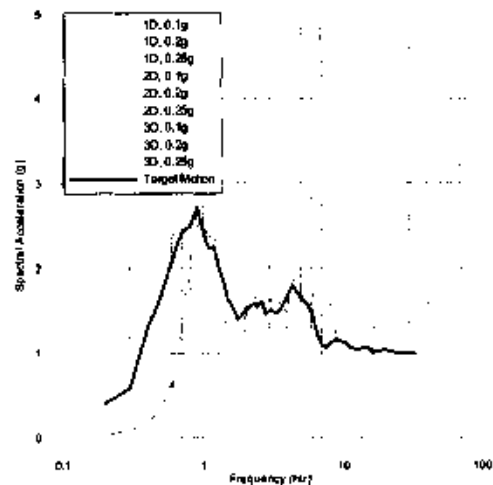
Input	Target	Scenario	TCU052	NRC
1D	0.1	0.133	0.085	0.132
	0.2	0.322	0.158	0.287
	0.25	0.414	0.192	0.331
2D	0.1	0.121	0.084	0.127
	0.2	0.326	0.187	0.272
	0.25	0.399	0.222	0.323
3D	0.1	0.125	0.076	0.134
	0.2	0.311	0.159	0.264
	0.25	0.395	0.208	0.314

입력된 지진파의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 각 입력지진파의 PGA를 1g로 정규화 하여 그림 9에서 그 응답스펙트럼을 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 목표로 하였던 지진파의 응답스펙트럼과 비교해 보면 크게 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 고진동수 부근에서는 목표보다 크게 입력된 반면 저진동수 대역에서는 목표보다 작게 입력된 것을 알 수 있다. 고주파수에서 탁월주파수대역이 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 목표지진보

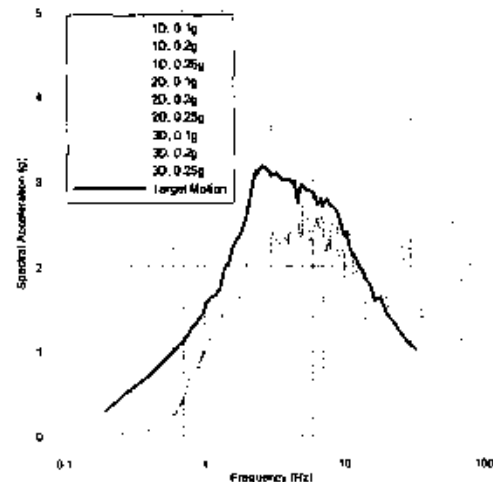
다 2배 이상 큰 지진력이 입력된 것을 알 수 있다. 국내 원전의 내진설계기준인 NRC 스펙트럼을 이용한 인공지진의 경우는 저주파수 부근에서 목표지진과 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있으며 역시 20Hz 부근에서도 큰 값을 보이는 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진



(b) TCU052 지진



(c) NRC 지진

그림 9 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 하더라도 매 실험에 따라 같은 지진파라고 볼 수는 없으며 모든 경우 다른 지진을 사용한 것으로 가정하고 면진기기의 응답을 분석하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.1.2 FPS 변위한계에 대한 분석

면진기기의 최대가속도 분석에서 나타난 바와 같이 TCU052와 같은 근거리 지진에서 FPS로 면진한 기기에서 과도한 가속도 응답이 관측되었다. 이러한 이상응답을 분석해 보기 위하여 3D 실험의 목표지진 0.2g인 경우에 대하여 가속도 응답과 변위 응답을 이용하여 구한 변위응답을 다음의 그림 10에 도시하였다.

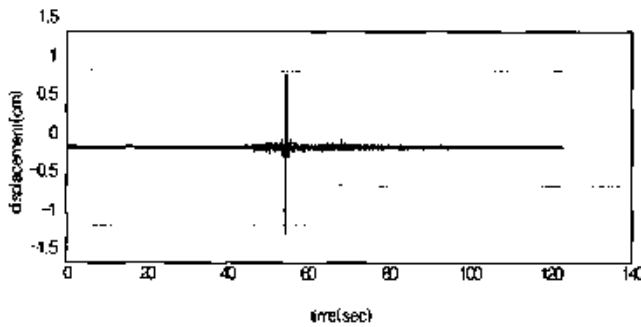
그림에서 보는 바와 같이 가속도의 적분에 의해서 계산된 TCU052 지진의 최대 변위응답은 3.78cm 인 것으로 나타났다. 그러나 FPS의 제작도면인 그림 5에서 보면 FPS의

최대변위는 3.2cm에 불과한 것을 알 수 있다. 따라서 FPS의 slider가 충돌을 일으켜 이와 같은 가속도 응답이 나타난 것으로 판단된다. FPS를 이용한 실험에서 이러한 현상이 발생하면 충돌 이후의 가속도 응답은 의미가 없는 것으로 간주하는 것이 일반적이다.

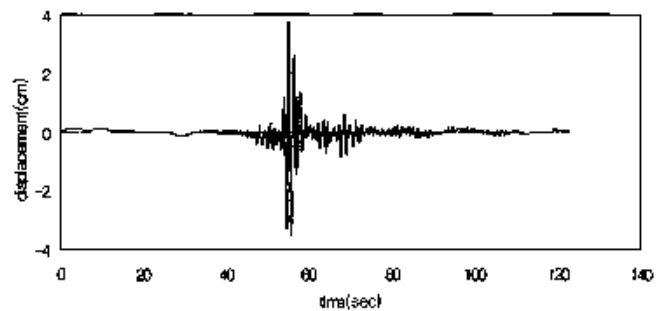
4.2 지진응답비 분석

올바른 내진성능의 분석을 위해서는 면진되지 않은 경우와 면진된 경우의 지진응답을 비교하는 것이 타당하지만 본 연구에서는 면진된 기기가 강제저동하는 것을 가정하여 기기를 강제로 모형하여 실험을 수행하였으므로 입력지진과 면진된 기기에서의 응답을 비교하여 면진효과를 분석하였다. 따라서 1층 기기와 4층 기기에 대하여 층에서의 최대입력지진가속도와 기기에서의 최대응답가속도를 단순 비교하므로써 면진장치의 면진성능을 비교해 보았다. 지진응답비는 다음 식과 같이 정의되며 1층 기기와 4층 기기에 대하여 각각 표 4에서 제시하였으며 전체적인 경향을 파악하기 위하여 각 진동대 실험 경우마다 1방향 가진에 대한 지진응답비를 그림 11과 12에 도시하였다. 가진 차원에 따른 면진기기의 거동 차이를 비교해 보고자 동일 지진파를 사용하였을 경우 가진차원에 따른 지진응답비를 비교할 수 있도록 도시하였다.

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



(a) 가속도 응답



(b) 변위응답

그림 10 TCU052지진시 1층 기기에서의 응답(3D, 0.2g)

표 4 4층 구조물 기기 지진응답비율

지진파		Scenario							NRC						TCU052					
차원	PGA	1층			4층			1층			4층			1층			4층			
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
1D	0.1g	1.19	-	-	0.93	-	-	1.08	-	-	2.01	-	-	1.37	-	-	1.48	-	-	
	0.2g	0.72	-	-	0.55	-	-	0.61	-	-	1.92	-	-	5.56	-	-	1.48	-	-	
	0.25g	0.49	-	-	0.55	-	-	0.83	-	-	1.83	-	-	5.19	-	-	1.45	-	-	
2D	0.1g	1.39	1.17	-	0.98	0.81	-	1.13	0.83	-	1.99	0.46	-	0.98	0.79	-	1.33	0.79	-	
	0.2g	0.51	0.55	-	0.54	0.45	-	0.69	0.63	-	1.70	0.43	-	6.72	7.82	-	1.25	0.99	-	
	0.25g	0.44	0.58	-	0.56	0.61	-	0.92	0.77	-	1.91	0.50	-	3.60	5.30	-	1.22	1.13	-	
3D	0.1g	1.40	1.07	1.23	0.94	0.59	2.62	1.15	0.82	1.09	1.98	0.46	1.31	1.10	1.10	1.02	1.45	0.87	1.29	
	0.2g	0.53	0.59	1.18	0.57	0.50	2.72	0.74	0.65	1.08	1.88	0.50	1.52	7.07	5.43	3.49	1.44	1.01	4.16	
	0.25g	0.45	0.56	1.18	0.58	0.57	2.68	1.02	0.82	1.09	2.01	0.55	1.59	4.26	4.18	1.69	1.27	1.02	1.87	

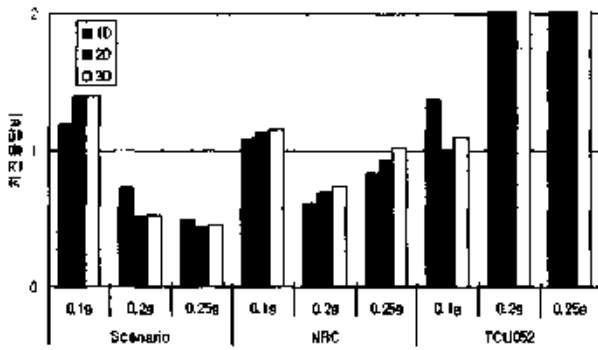


그림 11 지진응답비율 (1층 기기)

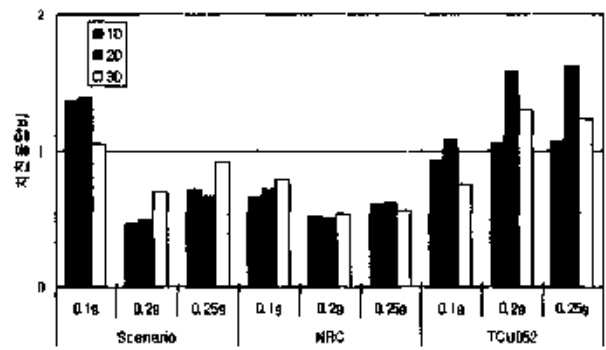


그림 12 지진응답비율 (4층 기기)

그림과 표에서 보는 바와 같이 TCU052지진의 경우를 제외하면 전체적으로 면진효과가 매우 우수한 것을 알 수 있다. 1층 기기의 경우는 전술한 바와 같이 면진기에서 FPS의 최대 변위를 초과하는 변위가 발생하므로써 매우 큰 가속도 응답을 보여주고 말았다.

그러나 TCU052지진의 0.1g에 대한 실험결과를 보면 이러한 근거리 지진의 경우는 FPS를 이용한 면진이 용이하지 않음을 알 수 있다. 근거리 지진은 저주파수 특성을 가지며 펄스타입의 지진파형태를 가지므로 FPS와 같이 마찰력을 이용하여 면진을 하고자 하는 경우 불리한 결과를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 다만 본 실험에 사용한 FPS의 목표 주기가 TCU052지진의 탁월주기와 유사한 범위에 있으므로 목표주기를 더 증가시킨 FPS를 제작하여 실험을 수행할 경우 본 실험의 경우보다 우수한 면진효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

본 실험의 2D 경우는 수평 2축방향에 대한 진동이므로 지진파의 연직성분에 대한 비교를 위해서는 2D 경우와 3D 경우를 비교하여야 한다. 그림 11에서 보는 바와 같이 1층 기기의 경우는 연직지진성분에 따른 지진응답비의 영향이 별로 없는 것으로 나타나고 있다. 반면 그림 12의 4층 기기에서는 Scenario 지진의 경우 연직지진동 성분이 있는 3D

경우와 그렇지 않은 경우의 지진응답비가 명확하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. NRC 지진의 경우는 연직지진성분에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보이며 또한 TCU052지진의 경우도 연직성분에 의한 연관성은 크지 않은 것으로 보인다. 이것은 Scenario 지진의 경우 연직 지진성분도 그림 8에서 보는 바와 같이 20Hz 부근에서 탁월주파수대가 형성되는 고주파 성분이 강한 지진이므로 구조물의 연진고 유진동수와 공진을 일으켜서 FPS의 면진성능에 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉 연직성분의 지진력이 FPS에 크게 작용함으로써 마찰력에 영향을 미쳐서 면진성능이 변화된 것으로 판단된다.

4.3 시간이력 분석

전술한 바와 같이 고진동수 성분이 우수한 Scenario 지진의 경우는 연직지진동 성분에 의하여 FPS의 면진효과가 변화하는 반면 NRC와 TCU052와 같은 경우는 연직지진동 성분에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이와같은 현상을 좀 더 자세히 분석해 보기 위하여 2D와 3D로 실험한 경우에 대한 기기에서의 가속도 시간이력에 대한 분석을 수행하였다. 따라서 다음의 그림 13에서 Scenario

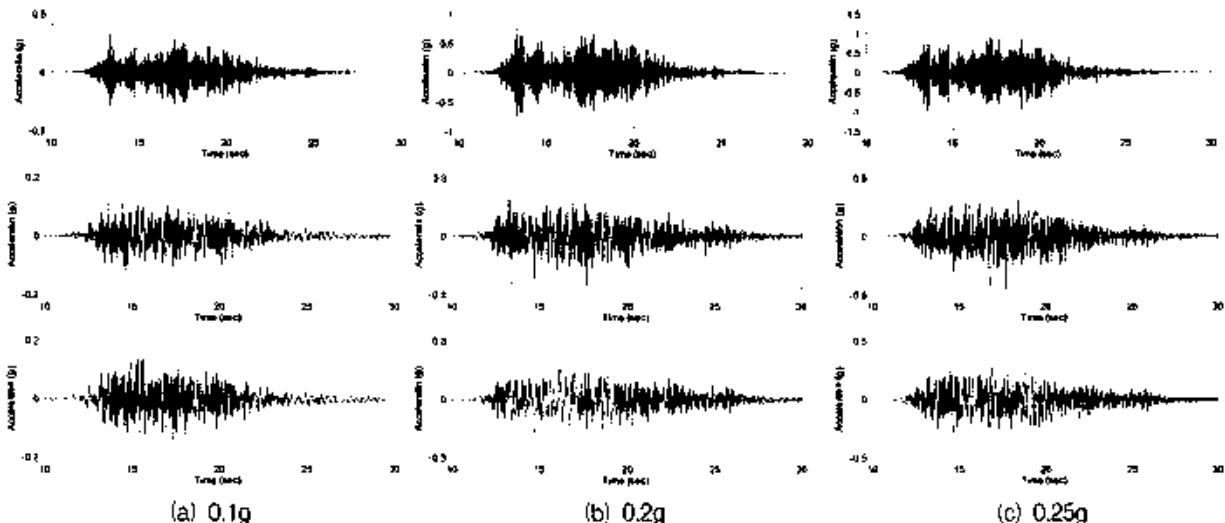


그림 13 Scenario 지진시 면진기기에서의 응답 가속도 시간이력

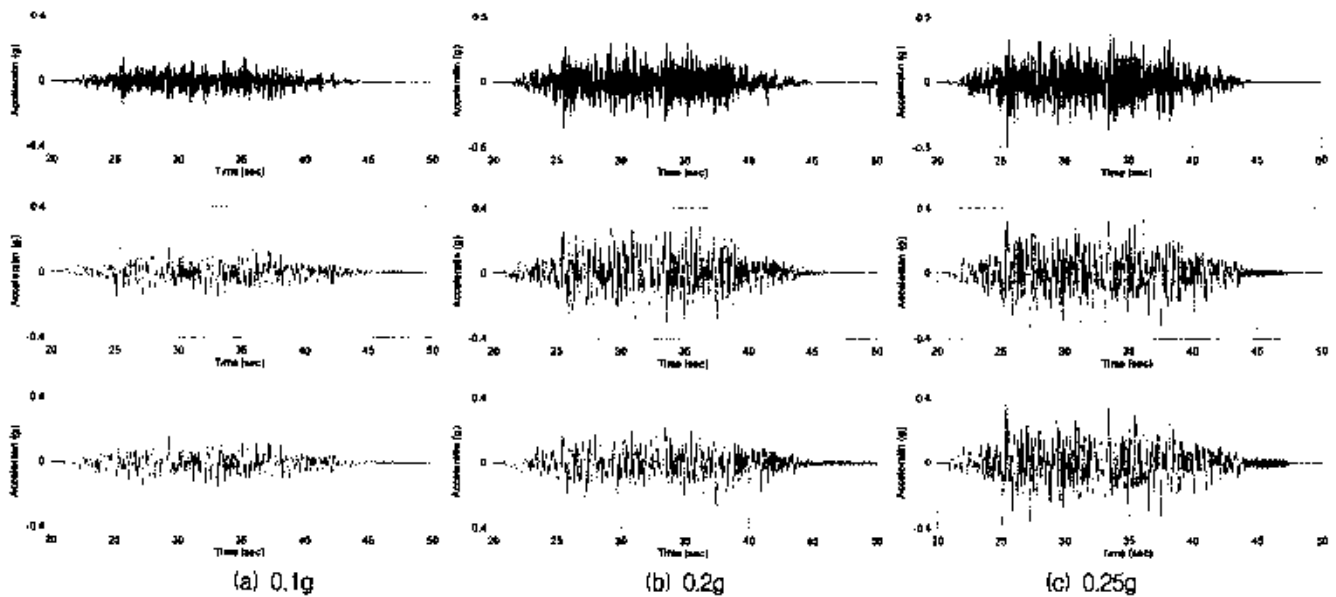


그림 14 NRC 지진시 면진기기에서의 응답 가속도 시간이력

지진의 경우에 가속도 시간이력을 도시하였다. 그래프는 아래에서부터 2D 수평방향, 3D 수평방향 그리고 3D 연직방향의 가속도 시간이력을 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진으로 가진한 경우는 수평하중이 동일함에도 불구하고 기기에서의 응답 가속도 시간이력이 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 연직성분의 지진력이 있는 3D인 경우 2D인 경우와 비교하여 고주파 성분이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 연직성분 가속도 시간이력에서 상당히 고주파 성분의 지진응답이 나타나는 것과 연계하여 생각할 수 있다. 고주파 성분의 탁월한 Scenario 지진의 연직성분이 구조물의 연직 진동특성에 의해서 고주파성분이 증폭되어 FPS의 마찰력에 영향을 미치므로 면진기동에 변화를 가져온 것이다. Scenario 지진의 경우와 비교를 위하여 NRC 지진의 경우에도 동일하게 가속도 시간이력을 다음의 그림 14에 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 NRC 지진의 경우는 Scenario 지진의 경우와는 대조적으로 2D실험의 경우와 3D 실험의 경우에 최대가속도와 파형에 있어서 차이점을 발견하기 어려운 것을 알 수 있다. Scenario 지진의 경우는 연직성분의 지진력이 존재하는 3D의 경우에 고주파 성분이 증가하

였는데 NRC 지진의 경우는 연직방향 지진력에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 연직방향 가속도 시간이력을 보면 Scenario 지진의 경우는 지진력의 증폭이 상당히 발생하였는데 NRC 지진의 경우는 지진력의 증폭이 크지 않기 때문에 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 FPS를 사용한 면진이 전반적으로는 지진력을 저감시키지만 Scenario 지진과 같이 고주파 성분이 탁월한 지진이 발생할 경우에 또 지진파의 연직성분이 크게 작용할 경우에는 면진효과에 영향을 받으므로 이에 대한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

4.4 응답스펙트럼 분석

시간이력 비교를 통하여 나타난 바와 같이 Scenario 지진과 NRC 지진의 경우 면진효과에 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상을 응답스펙트럼 분석을 통해서 상세하게 분석하였다. Scenario 지진과 NRC 지진에 따른 4층 면진기기에서의 응답스펙트럼을 그림 15과 16에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진의 경우, 특히 0.2g와 0.25g로 실험한 경우에는 기기가 위치하고 있는 Table에서의 응답이 유사함에도 불구하고 기기에서의

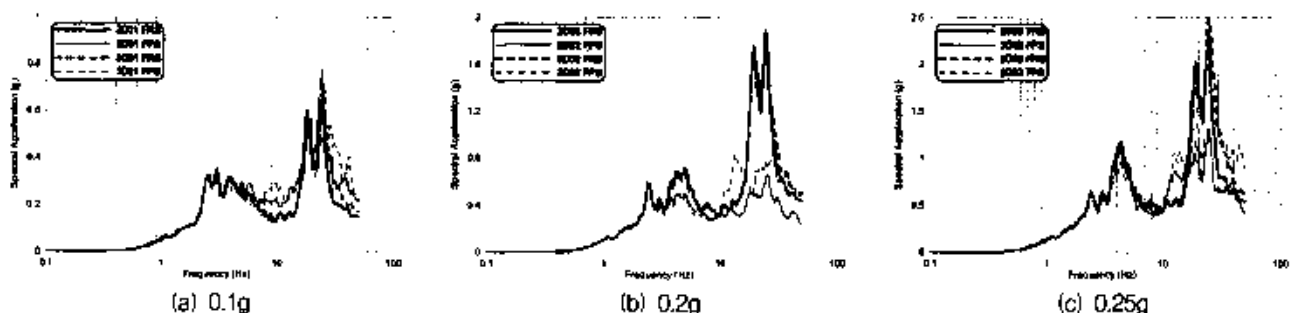


그림 15 Scenario 지진시 면진기기에서의 응답 가속도 시간이력

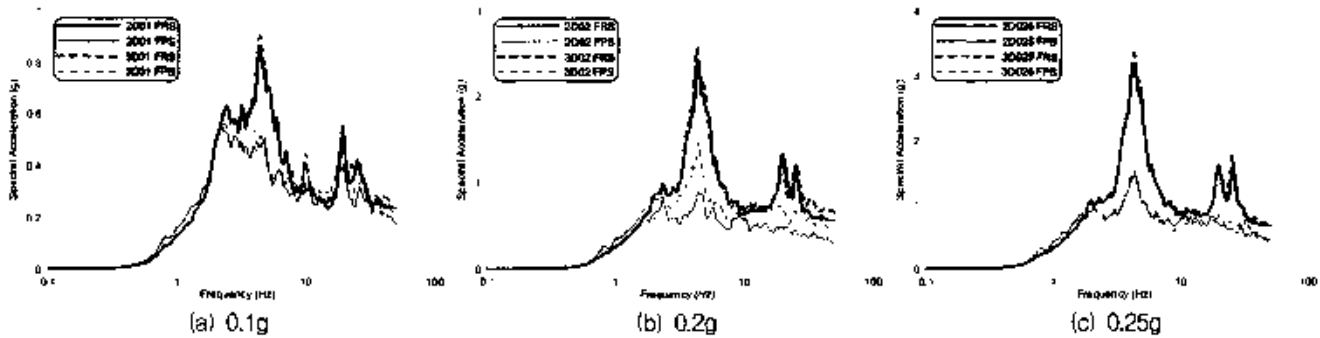


그림 16 NRC 지진시 면진기기에서의 응답 가속도 시간이력

응답이 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 저주파수 대역에서는 거의 발견되지 않고 10Hz 이상의 고주파수 영역에서 차이가 발생되고 있다. 반면 NRC 지진의 경우는 연직지진력에 의한 기기의 응답차이가 크게 나타나고 있지 않은 것을 알 수 있다. Scenario 지진에서의 이러한 차이는 입력지진의 연직성분이 고진동수인 것에 기인한 것으로 판단되며, 지진파의 수평성분이 고진동수인 경우 FPS가 우수한 면진효과를 발휘할 수 있지만 고진동수의 연직성분이 작용하는 경우 FPS와 같은 마찰형 면진장치는 면진효과가 감소할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원전기기의 내진안정성을 향상시키기 위한 방안으로 FPS가 설치된 면진기기에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 근거리 지진의 특성인 저주파수 지진의 경우 면진효과를 얻기가 쉽지 않은 것으로 나타났다. 이러한 지진은 국내를 비롯하여 많은 내진설계기준에서 제안하고 있는 설계 응답스펙트럼의 주파수 범위와 같지 않으므로 향후 내진 설계시 주의가 필요한 것으로 판단된다.
- 탁월주파수대가 20Hz 이상인 Scenario 지진에 의한 실험결과 연직지진력이 면진효과에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 구조물이 지진파의 연직방향 고유진동수와 유사함에 따라 연직방향 지진력이 증폭되어 일어난 현상이므로 FPS의 사용시는 연직방향 지진력의 고려가 필요함을 알 수 있었다.
- FPS는 지진력이 상대적으로 작은 경우에는 초기장성의 영향으로 지진력 저감효과가 적게 나타났으나 지진력이 증가하면서 지진력 저감효과가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 면진효과는 고무베어링에 비하여 상대적으로 작으며, 지진력이 증가할 경우에는 변위한계의 결정이 지진력저감에 중요한 요소임을 알 수 있었다.
- FPS에 대한 특성시험 결과 마찰면의 곡률반경이 작을 경우 마찰재로 사용하는 PTFE의 마찰에 의한 저항에 수평분력에 의한 저항이 추가되면서 동일 변형에 대해 수평하

중이 크게 평가되는 것을 알 수 있었다. 따라서 소규모 FPS의 설계시는 마찰면 곡률에 의한 영향을 검토하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 전영선, 최인길, "원전기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가", 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.
2. Saadeghvaziri, M.A. and Feng, M.Q., "Experimental and Analytical Study of Base-Isolation for Electric Power Equipments," Research Progress and Accomplishment 2000-2001, MCEER, 2001.
3. US NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
4. 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.
5. 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.
6. 김영중, 허영철, 김병현, "마찰진자형 면진베어링의 특성연구", 한국지진공학회 2000년도 추계학술발표회 논문집, 2000.
7. 이정진, 김갑순, 서용표, "FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가", 한국지진공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 2003.
8. 김대근, 이상훈, 김대영, 박철림, "적층고무베어링과 납-

- 고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가”, 한국지진 공학회 논문집, 제2권, 제4호, 1998, pp. 53-62.
9. 오순택, 김영석, 김연태, “교량에 설치된 마찰 단진자 시스템의 지진하중에 의한 거동연구”, 한국지진공학회 논문집, 제2권 제2호 1998, pp. 13-22.
 10. 고현무, 박관순, 김동석, 송현섭, “교량의 마찰형 지진력 라잡치 최적 인자 결정에 관한 연구”, 한국지진공학회 2002년 춘계학술대회 논문집, 2002.
 11. 김민규, 전영선, 최인길, “원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 I: 고무베어링”, 한국지진공학회 논문집, 게재예정, 2004.