

마찰진자베어링(FPS) 면진시스템을 적용한 원전주제어실의 진동대 실험 Experimental Study on Floor Isolation of Main Control Room of Nuclear Power Plant using FPS(Friction Pendulum System)

이경진* 함경원** 서용표***
Lee, Kyung Jin Ham, Kyung Won Suh, Yong Pyo

ABSTRACT

The seismic characteristics with Friction Pendulum System have been studied using a shaking table system. In this study, we made two kind of floor system (Type I, Type II) and several seismic tests with and without isolation system were conducted to evaluate floor isolation effectiveness of Friction Pendulum System. Both type have showed large reduction effectiveness in acceleration, response spectra but Type II have showed lower acceleration and lower first mode in response spectra, compared to type I. On the basis of test results and consideration of application, it is found that type II is more suitable for floor model of main control room of Nuclear Power Plant.

1. 서론

원전 주제어실은 핵심설비인 핵증기 공급계통(Nuclear Steam Supply System)의 전기, 계측기기를 제어하는 기능을 수행하고 있어 지진시 내진 안전성을 확보해야 할 필요가 있다. 이를 위해 주제어실의 액세스 플로어(Access Floor)에 층면진시스템을 도입하여 액세스 플로어 상부기기의 지진응답을 감소시키는 것이 효율적인 방안으로 제안되고 있으며 관련 분야의 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.⁽¹⁾

층면진시스템은 크게 2차원과 3차원 시스템으로 나뉘어진다. 2차원 층면진시스템에 도입되는 면진장치로는 적층형 납-고무베어링(LRB: Lead Rubber Bearing)과 마찰진자 베어링(FPS)이 일반적으로 사용되고 있으며, 3차원 층면진시스템은 일본에서 개발된 시스템으로서 2차원 층면진시스템에 점성댐퍼와 에어스프링을 도입하여 수평방향과 수직방향 지진동을 동시에 저감시키는 시스템으로서 2차원 층면진시스템과 비교하여 복잡한 방식으로 구성되어 있다.⁽²⁾

* 한전 전력연구원 선임연구원

** 한전 전력연구원 일반연구원, 정회원

*** 한전 전력연구원 책임연구원

면진장치 중에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 마찰진자 베어링은 Zayas, Mokha, Constantinou⁽³⁾ 등에 의해 제안된 장치이다. 마찰진자 베어링은 진자의 성질을 이용하여 지진격리된 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있는 면진장치로서 마찰판의 곡률반경을 설계해서 재하하중에 관계없이 구조물의 고유진동수를 가능한 한 낮게 결정할 수 있고, 에너지 감쇠능력을 고려하여 지진동에 의한 구조물의 응답을 감소시키는 장치이다. 마찰진자 베어링의 특성은 마찰판의 마찰계수에 크게 영향을 받으며 마찰력은 마찰면의 속도와 베어링의 압력, 마찰면의 표면상태에 좌우되는 것으로 보고 되고 있다.⁽³⁾

2. 진동대 실험 개요

2.1 원전주제어실 플로어의 부분모형

액세스 플로어의 부분모형을 2가지 종류로 제작하였다. Type I은 원전 주 제어실의 액세스 플로어를 재현한 것으로 그림 1에 모형의 크기와 형태 그리고 가속도계와 LVDT의 부착위치가 나타나 있다. Type I은 진동대의 크기에 맞추기 위해 $W \times D \times H = 2.5m \times 2.5m \times 0.8m$ 이고, H-200 \times 200 \times 8 \times 12 부재를 바닥 프레임으로 사용하여 전체 무게는 2.0톤으로 제작하였다.

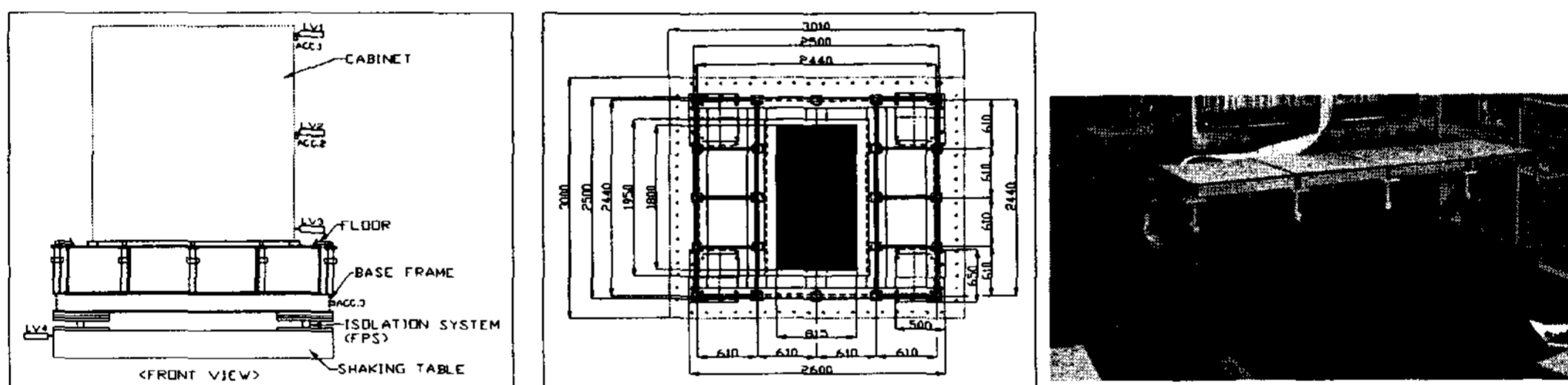


그림 1. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type I

Type II는 주 제어실의 액세스 플로어에서 그림 1의 입면에 나타난 수직지지대를 제거하고 바닥 프레임에 직접 상부기기를 고정시켜 설치하는 형식이다. 크기는 $W \times D \times H = 2.5m \times 2.5m \times 0.2m$ 이고 바닥 프레임은 Type I과 같은 부재를 사용하였으며 무게는 1.0톤이고, 그림 2에 전체 형태와 크기 그리고 가속도계와 LVDT의 부착위치가 나타나 있다.

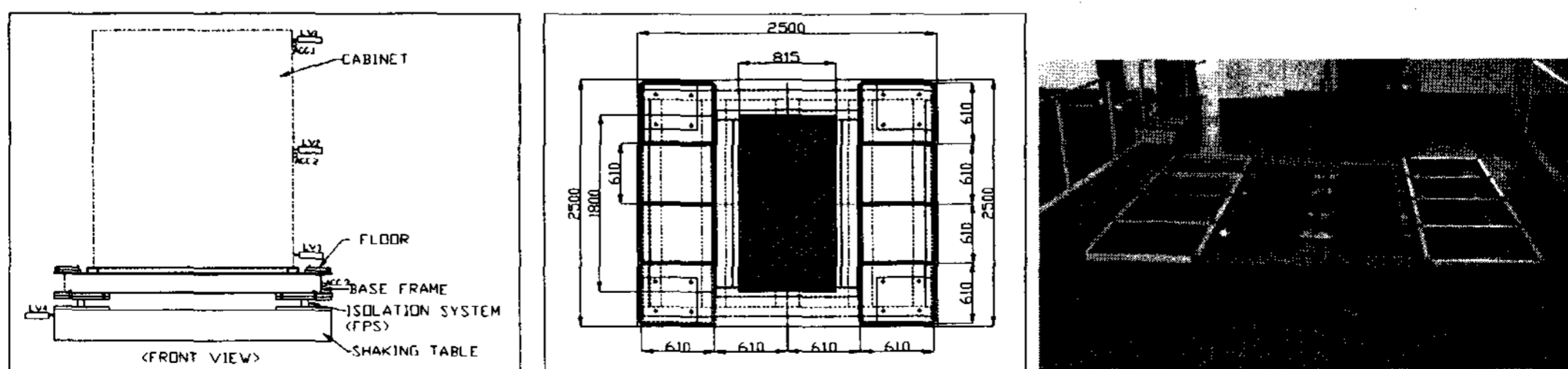


그림 2. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type II

2.2 제어 캐비닛과 FPS의 특성

플로어 시험모형 Type I, II에 부착하여 지진동 응답평가를 하고자 하는 시험설비는 울진원자력 1, 2호기의 주제어실에 설치되는 PCS 캐비닛이다(그림 3 참조). 실제 시험 시에는 부속기기는 제거하고 본체를 사용하여 평가를 수행하였고 본체만의 무게는 0.4톤이다.

시험에 사용한 면진장치는 마찰진자 베어링이고, 고유진동수는 0.5Hz로서 입력지진을 고려하여 결정하였다. 설계압축하중은 2tonf, 곡률반경은 0.99m이다. 곡면의 마찰재 성분은 순수 PTFE(Unfilled PTFE)이고, 마찰재 직경은 40mm, 지압면적은 12.566cm² 이다. 그림 4는 제작한 마찰진자 베어링을 나타낸 것이다.

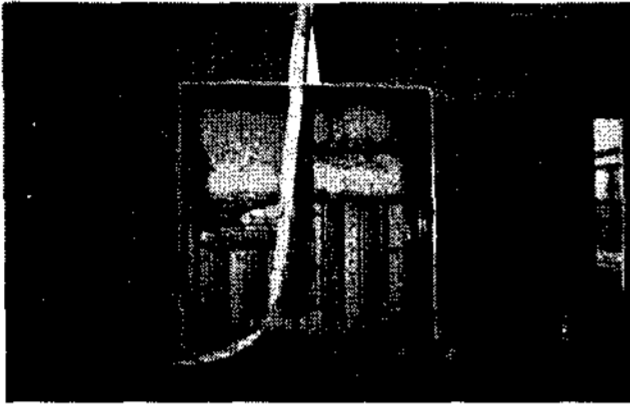


그림 3. PCS 캐비닛

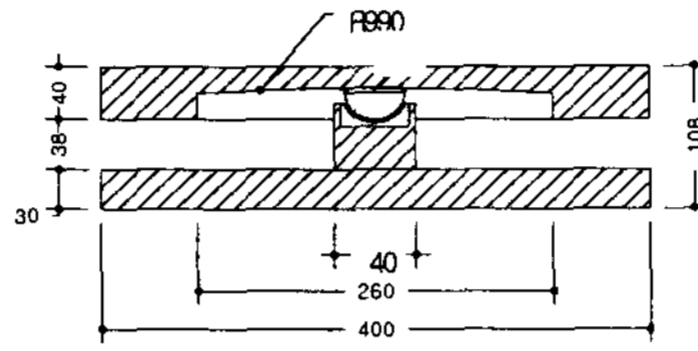


그림 4. 마찰진자 베어링



2.3 입력 지진파와 시험방법

주제어실 플로어에 층면진장치를 적용하여 지진동저감성능을 평가하기 위해 Type I, Type II 모형을 실규모 부분모형으로 설계, 제작하여 층면진장치를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 진동대 시험을 수행하였다. 진동대 시험에 사용한 지진입력은 표준원전 설계응답 스펙트럼인 운전 기준지진(OBE), 안전정지지진(SSE) 스펙트럼 수평방향 성분에서 생성한 시간-가속도 이력과 El-Centro, Hachinohe, Kobe 수평방향지진을 입력지진으로 하여 특성평가를 수행하였다. 표 1에 입력 지진파의 특성을 요약하였으며, 그림 5에 원전 보조건물 144ft에서의 OBE와 SSE의 층응답 스펙트럼(FRS)을 나타내었다.

표 1. 입력지진파 제원

지진파	년도	장소	규모	시간	GPA(g)	비고
El-Centro	1940	미국	6.5	53.74	0.753	
Hachinohe	1968	일본	7.9	36.00	0.349	
Kobe	1995	일본	7.2	50.00	0.229	50% 가속도
OBE(144ft)					0.209	FRS, 5%댐핑
SSE(144ft)					0.554	FRS, 5%댐핑

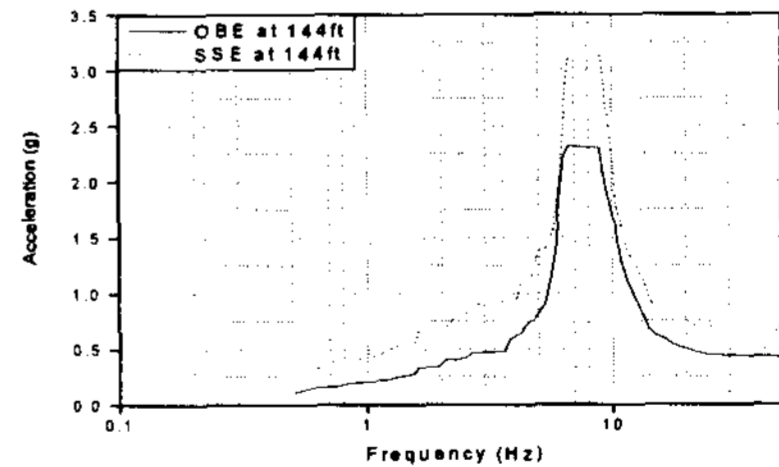


그림 5. 144ft에서의 OBE와 SSE

2.4 면진장치 지진저감성능 평가시험

캐비닛의 응답을 계측하기 위하여 그림 1 ~ 그림 2에 표시한 것처럼 가속도 센서를 캐비닛과 액세스 플로어에 3개, LVDT를 4개 설치하였고, 면진장치(FPS)는 플로어의 네 모서리에 모두 4개를 설치하여 면진장치를 설치하지 않은 경우와 비교하여 실험을 수행하였다.

3. 시험결과 및 분석

시험모형 Type I, Type II에 면진장치를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 각각 진동대 시험을 수행하여 캐비닛의 높이별 최대응답가속도와 캐비닛 중앙부에서 응답스펙트럼을 비교, 분석한 결과는 다음과 같다

3.1 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 분석

캐비닛의 최상부와 중앙부, 하단부에서의 수평방향 최대응답가속도를 그림 6 ~ 그림 10과 표 2에 정리하였다. 캐비닛 상부로 올라갈수록 응답가속도가 커지며, 면진장치를 설치한 플로어의 최대응답가속도가 시험모형 Type I의 경우 감쇠율이 9%~92% 수준이고, 시험모형 Type II의 경우는 7%~92% 수준이다 (감쇠율 = 100% - (면진/비면진)×100%).

표 2. 캐비닛의 높이별 최대응답가속도

지진파 (최대가속도, g)		최상부에서의 최대가속도 (g)			중앙부에서의 최대가속도 (g)			하단부에서의 최대가속도 (g)		
		비면진	면진	감쇠율 (%)	비면진	면진	감쇠율 (%)	비면진	면진	감쇠율 (%)
El-Centro (0.349)	Type I	0.435	0.173	▽60	0.362	0.137	▽62	0.305	0.097	▽68
	Type II	0.485	0.244	▽50	0.422	0.190	▽55	0.349	0.131	▽62
Hachinohe (0.229)	Type I	0.190	0.173	▽9	0.205	0.133	▽35	0.169	0.093	▽45
	Type II	0.192	0.179	▽7	0.222	0.152	▽32	0.198	0.109	▽45
Kobe (0.209)	Type I	0.218	0.141	▽35	0.203	0.106	▽48	0.126	0.083	▽34
	Type II	0.183	0.142	▽22	0.228	0.119	▽48	0.196	0.090	▽54
OBE (0.554)	Type I	2.030	0.280	▽86	1.706	0.187	▽89	0.531	0.098	▽82
	Type II	1.900	0.266	▽86	1.622	0.195	▽88	0.562	0.122	▽78
SSE (0.753)	Type I	2.680	0.284	▽89	2.362	0.184	▽92	0.731	0.083	▽89
	Type II	2.520	0.253	▽90	2.300	0.177	▽92	0.770	0.112	▽85

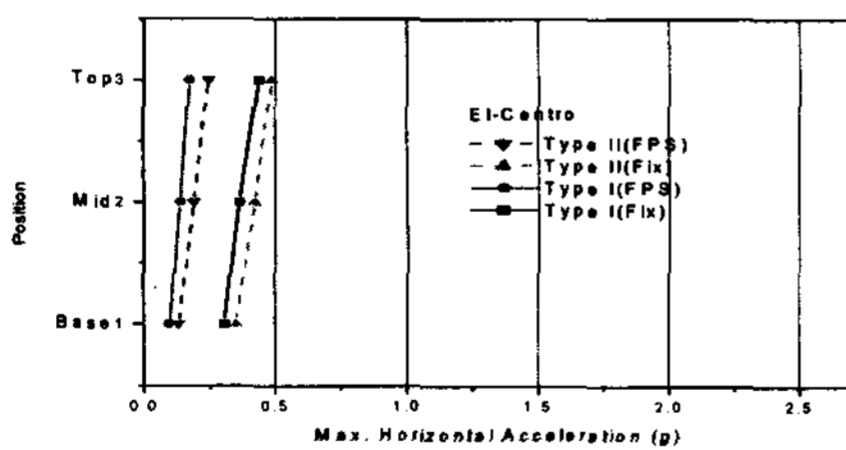


그림 6. 높이별 최대가속도 (El-Centro)

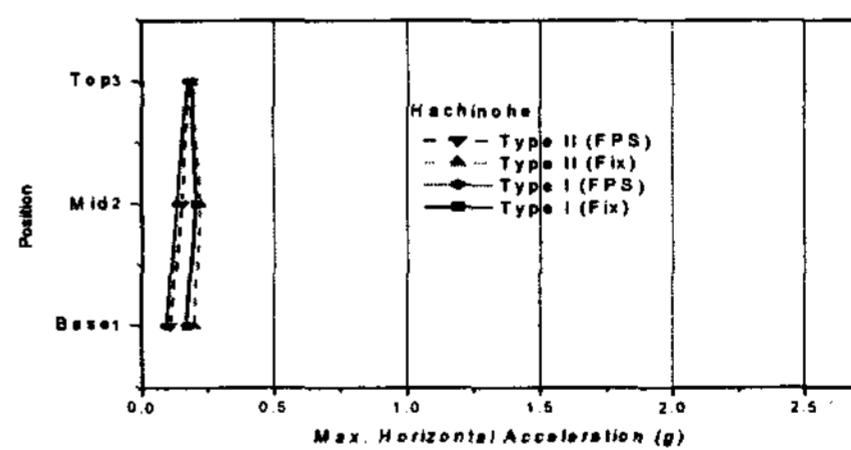


그림 7. 높이별 최대가속도 (Hachinohe)

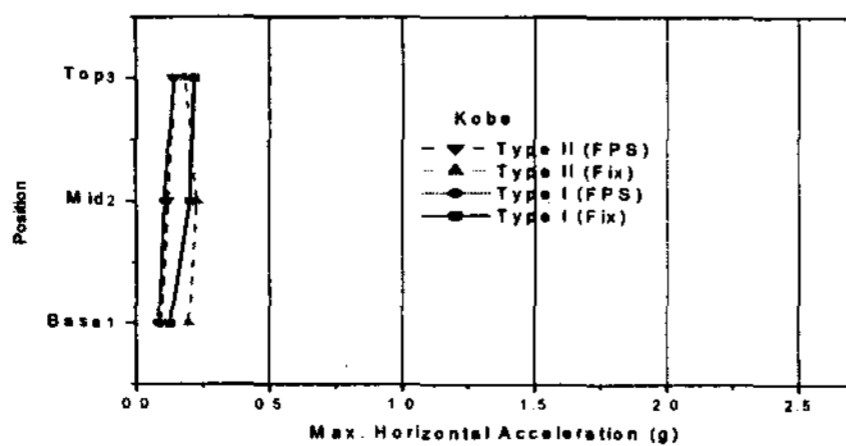


그림 8. 높이별 최대가속도 (Kobe)

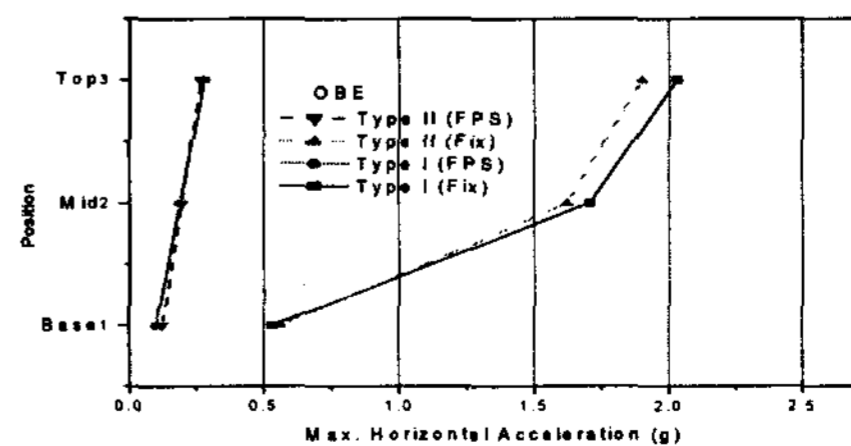


그림 9. 높이별 최대가속도 (OBE)

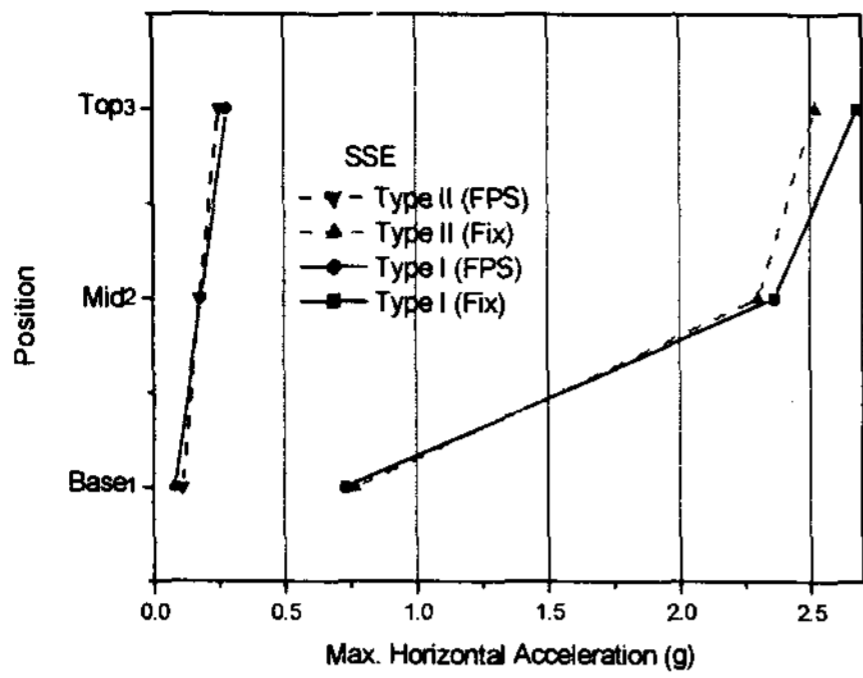


그림 10. 높이별 최대가속도 (SSE)

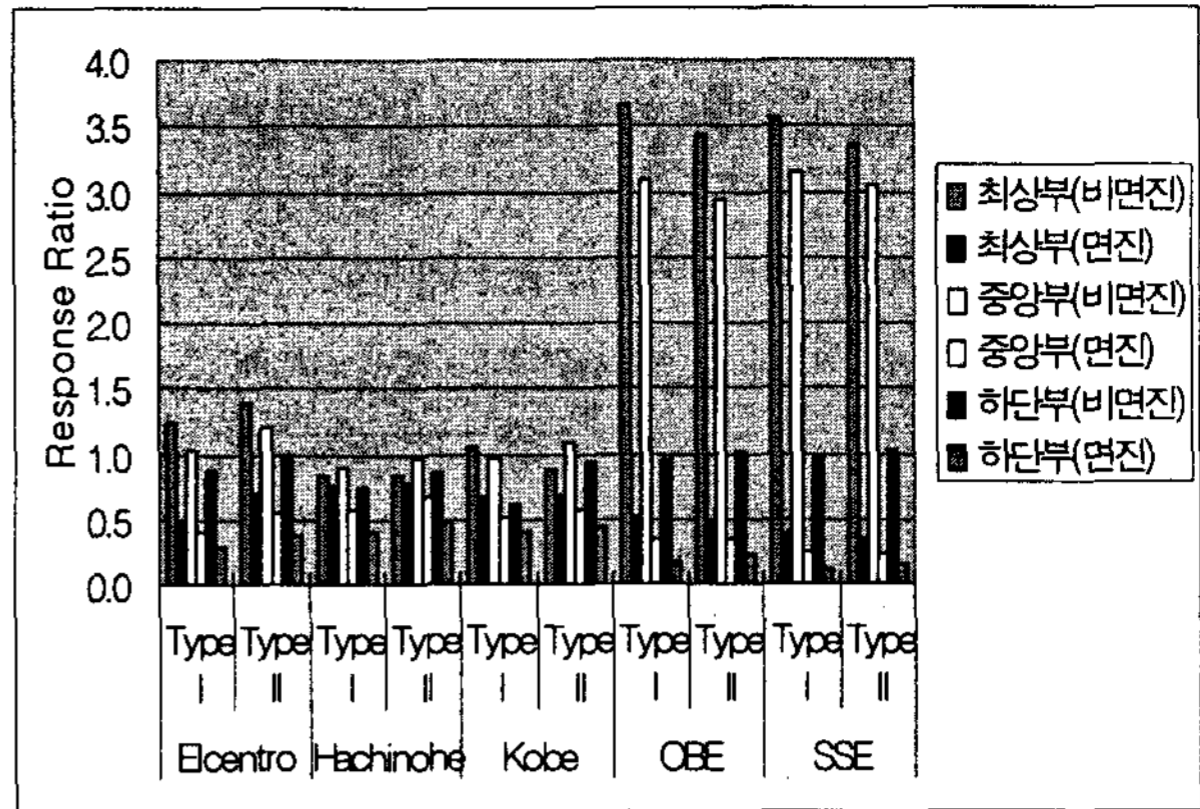


그림 11. 지진별 최대가속도 응답비

3.2 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비 분석

그림 11은 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비를 나타낸 것이다. 각 지진별로 시험모형 Type I 과 Type II의 면진, 비면진시를 비교하여 최대가속도의 응답비(Response Ratio)를 나타낸 것으로서 입력지진동의 최대가속도를 1로 하여 지진응답비를 나타냈다.

$$\text{최대가속도 응답비} = \frac{\text{캐비닛 최대응답가속도}}{\text{입력지진 최대가속도}}$$

3.3 캐비닛의 시간-가속도 이력 분석

그림 12~13은 캐비닛 하단부에서의 각 지진별로 시험모형 Type I, Type II에 대한 시간-가속도 이력을 나타낸다. 고진동수 성분이 많고 최대가속도가 큰 경우에 더욱 큰 면진효과를 보여주고 있다.

(1) Type I

시험모형 Type I의 캐비닛 하단부에서의 시간-가속도 이력은 저진동수 성분이 많은 El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진과 고진동수 성분이 많은 OBE, SSE 경우에 응답이 확연히 구별되는 특성을 나타낸다. 저진동수 성분이 많은 입력지진인 경우에는 면진, 비면진시 응답이 큰 차이를 보이지 않지만 고진동수 성분이 많은 입력지진인 경우에는 면진, 비면진시 응답이 큰 차이를 보이고 면진효과가 크게 나타났다. OBE와 SSE는 서로 진동수 성분이 비슷하고 SSE의 최대가속도가 OBE에 비해 35%정도 크지만, SSE가 OBE에 비해 면진효과가 크게 나타나고 있다.

(2) Type II

시험모형 Type II의 시간-가속도 이력은 전체적으로 시험모형 Type I과 유사한 경향을 나타내고 있다. 저진동수 성분이 많은 입력지진인 경우에는 면진효과가 크지 않게 나타났다. 고진동수 성분이 많은 OBE, SSE 입력지진인 경우에는 면진효과가 Type I에 비해 더욱 크게 나타나는데 그것은 Type I에 비해 Type II의 시험체가 높이가 낮기 때문에 지진 응답이 적게 나타나는 것으로 보인다.

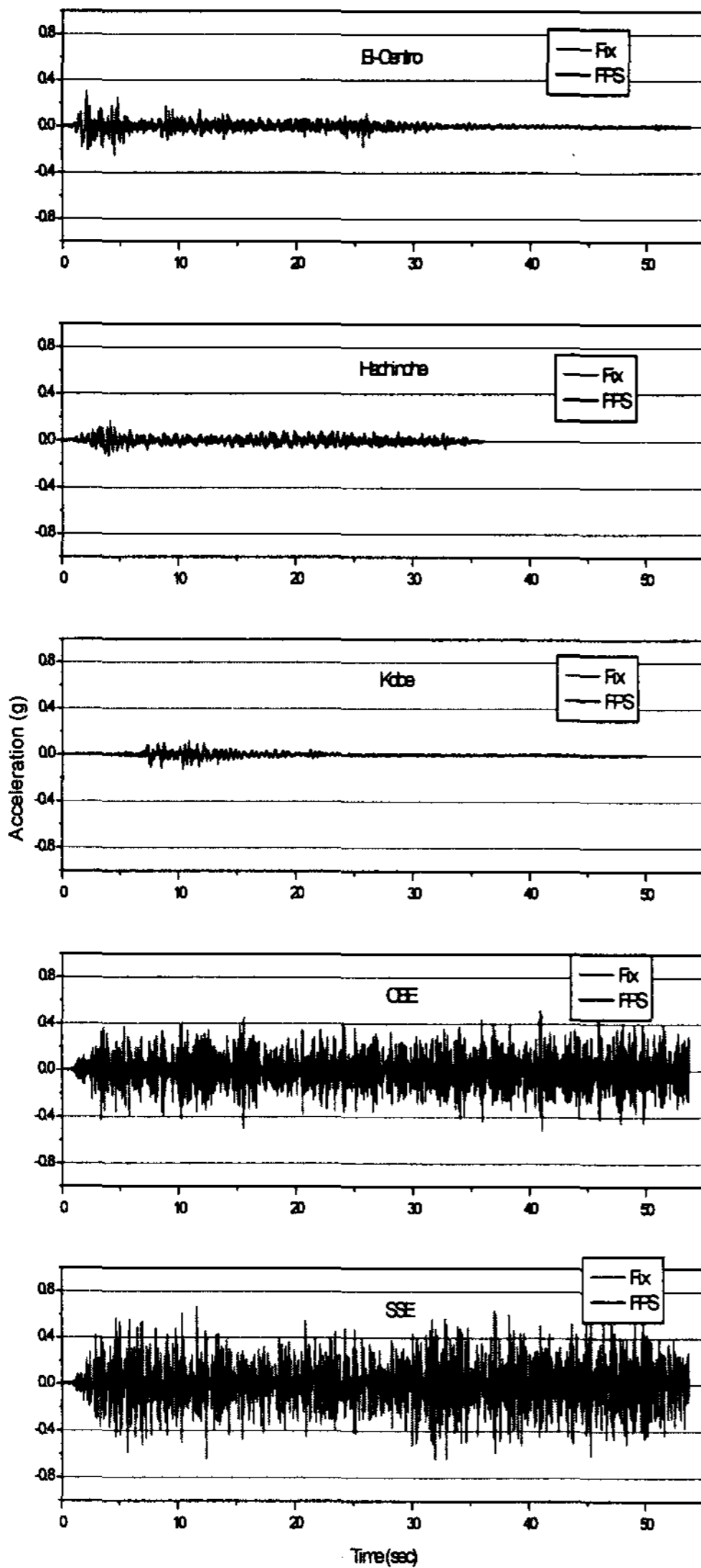


그림 12. 캐비넷 하단부에서의 시간-가속도 이력비교 (Type I)

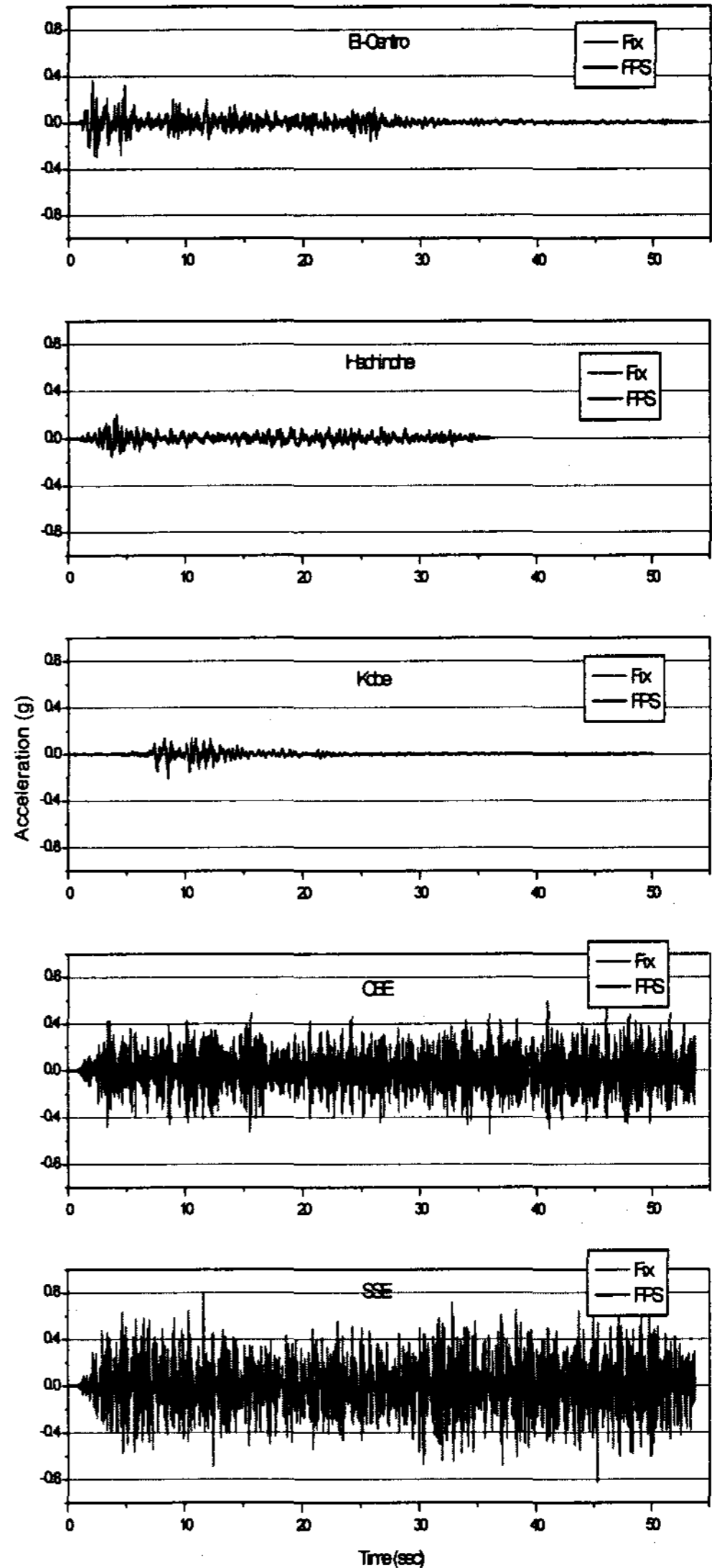


그림 13. 캐비넷 하단부에서의 시간-가속도 이력비교 (Type II)

3.4 캐비넷의 응답 스펙트럼 분석

캐비넷 중앙부에서의 응답스펙트럼(Damping 5%)을 그림 14 ~ 그림 15에 나타내었다. 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 면진장치를 설치한 경우 일반지진의 경우에는 저진동수 영역으로 이동하였고, OBE와 SSE의 경우에는 고진동수 영역으로 이동하였다. 그러나 최대응답은 두 경우 모두 저감되었다.

시험모형 Type I의 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼을 비교한 결과, El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진 등의 일반 지진보다는 OBE, SSE와 같은 원전설계지진에서 지진동 저감효과가 더욱 크게 나타났다. El-Centro의 경우 비면진시 최대응답 진동수가 8.7Hz에서 면진시 2.1Hz로 이동하였고, SSE는 8.8Hz에서 17Hz로 이동하였다. 가속도는 경우 El-Centro의 경우 최대 1.3g에서 0.3g로 저감되었고, SSE는 7.0g에서 1.0g로 감소하였다.

시험모형 Type II의 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼을 비교한 결과, 지진동 저감효과는 Type I과 비슷하게 나타났다. El-Centro의 경우 비면진시 최대응답 진동수가 4.0Hz에서 면진시 2.1Hz로 이동하였고, SSE는 9.0Hz에서 22Hz로 이동하였다. 가속도는 경우 El-Centro의 경우 최대 1.2g에서 0.5g로 저감되었고, SSE는 6.5g에서 0.7g로 감소하였다.

시험모형 Type I과 Type II 두 가지의 응답스펙트럼을 비교해 본 결과, 최대응답 스펙트럼은 비슷한 수준으로 저감되었다.

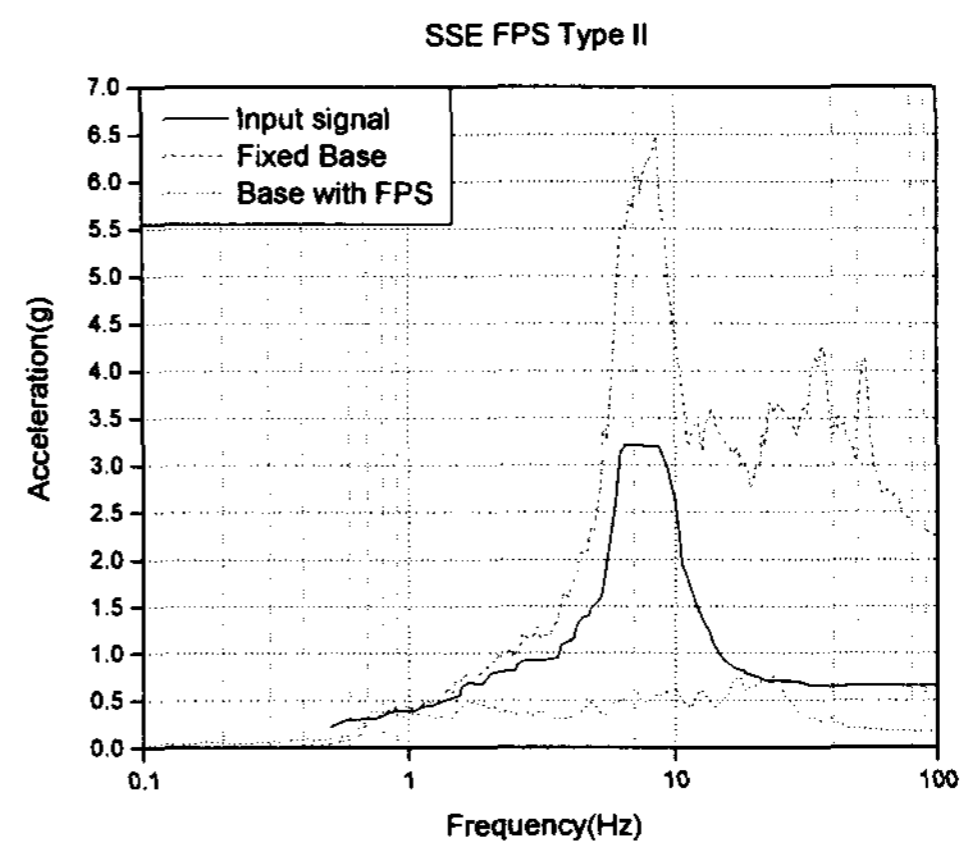
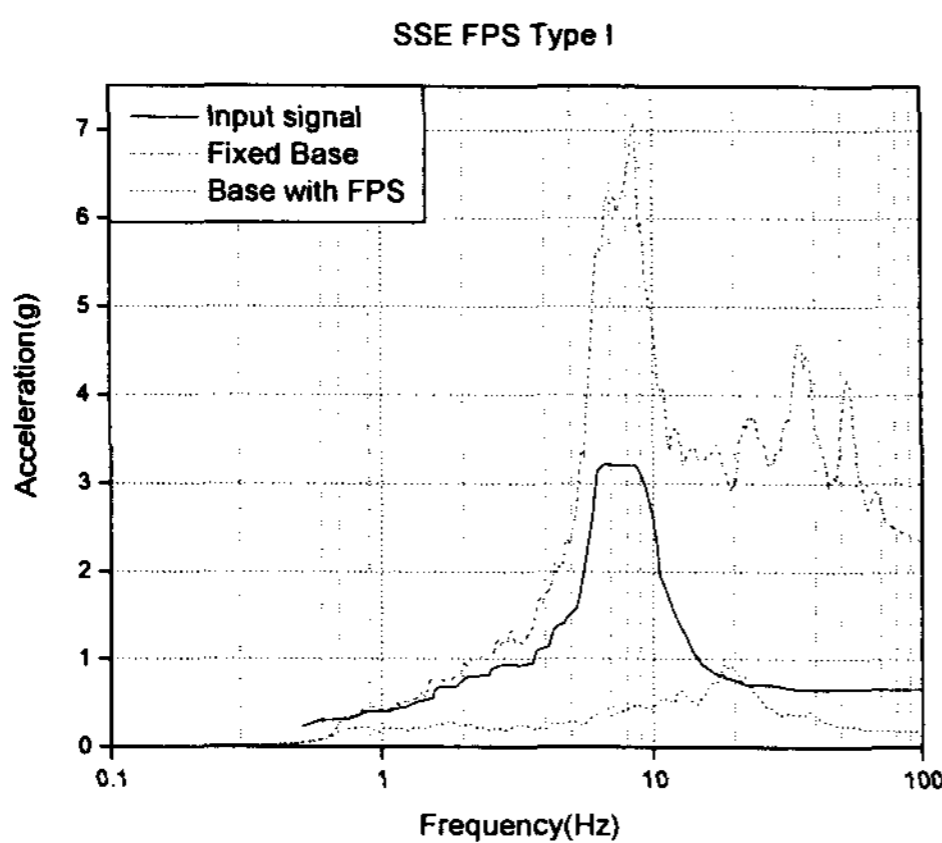
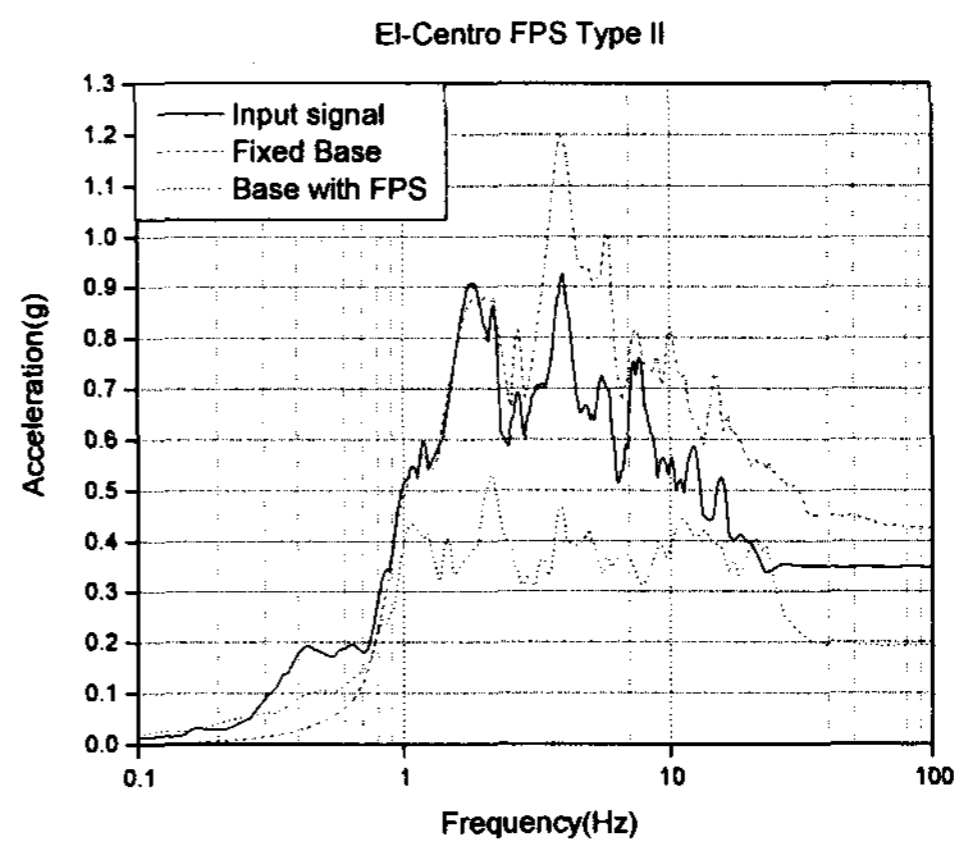
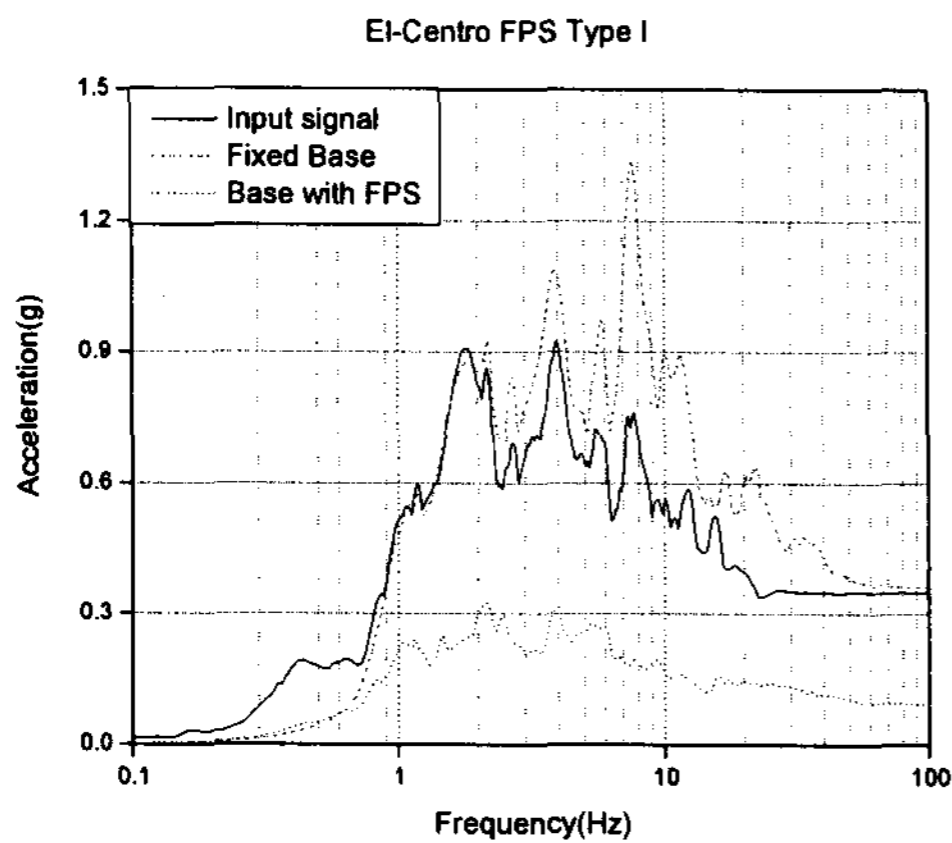


그림 14. 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼
El-Centro, SSE (Type I)

그림 15. 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼
El-Centro, SSE (Type II)

4. 결 론

마찰진자베어링을 사용한 층면진 시스템의 저감성능을 평가하기 위해 진동대 시험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 최대응답가속도를 비교해 본 결과 Type I과 Type II는 비슷한 경향을 나타내었다. OBE와 SSE의 경우, 캐비넷 하단부에서 저감이 크게 나타나(저감율:78%~89%), El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진에 비해 저감성능이 크게 나타났다(저감율:34%~68%). 이는 OBE와 SSE의 가속도 응답스펙트럼에서 최대값이 분포하는 진동수 영역이 8~9Hz로 일반 지진에 비해 고진동수 영역에 분포하며, 최대가속도도 다른 지진에 비해 크기 때문으로 판단된다.
- (2) Type I과 Type II의 시간-가속도응답 이력을 비교해 본 결과, 저진동수 성분이 많은 입력지진(El-Centro, Hachinohe, Kobe)인 경우에는 면진, 비면진시 응답이 큰 차이를 보이지 않지만 고진동수 성분이 많은 OBE, SSE의 경우에는 면진, 비면진시 응답이 큰 차이를 보이며, 면진효과도 크게 나타났다.
- (3) 캐비넷 중앙부에서의 응답스펙트럼을 비교한 결과, El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진 등의 저진동수 성분이 많은 지진보다는 OBE, SSE와 같은 고진동수 성분이 많은 지진에서 지진동 저감효과가 더욱 크게 나타났다.
- (4) Type I, Type II 모두 면진장치를 설치하여 실험한 결과 가속도, 응답 스펙트럼에서 지진동 저감효과가 크게 나타났으며, 시험모형에 따른 차이는 크지 않게 나타났다. 주제어실에 적용성을 고려해 볼 때, Type II가 Type I에 비해 설계가 단순화 되었고, 응답특성도 좋기 때문에 Type II가 원전주제어실 플로어 모형으로서 더 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 기반기금과제인 “원전 주제어실 지진응답 저감방안연구” 과제의 일부로서 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Ebisawa, K. Ando, K. Shibata, "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," Nuclear Engineering and Design 198, 2000, pp.61~74.
2. 이경진, “원전 주제어실 층면진 기술협의 공무 국외출장보고서”, ‘04 전력연-단717, TC.03NK01.02004. 717, 한국전력공사 전력연구원, 2004. 11.
3. Zayas V., Low, S.S. and Mahin, S.A., "The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. June, 1987.