

납-고무 베어링(LRB) 면진시스템을 적용한 원전주제어실의 진동대 실험 Experimental Study on Floor Isolation of Main Control Room of Nuclear Power Plant using LRB (Lead Rubber Bearing)

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

ABSTRACT

In this study, we made two types of main control room floor systems (Type I, Type II) and several shaking table tests with and without isolation system were conducted to evaluate floor isolation effectiveness of LRB(Lead Rubber Bearing). Both type showed large difference according to input earthquake signals, but showed little difference according to floor type. It is required to make LRB of which design frequency is below 1Hz when applied to main control room of NPP, but considering much difficulties in making such LRB, it is recommended that consideration should be taken into account when applied to main control room of NPP.

1. 서 론

최근에 전 세계적으로 발생한 잦은 대규모 지진의 피해로 인해 지진에 대한 대비를 체계적으로 수립해야 할 필요성이 제기되고 있으며, 우리나라에서도 중소규모의 지진활동이 최근 증가 추세에 있어 지진재해로부터 안전지대가 아님을 인식하게 되는 계기가 되고 있다.

지진에 의한 진동이 구조물의 기초에서 상부로 전달되는 것을 최소화하기 위해 면진장치의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 면진장치의 원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키고, 감쇠능력의 증가를 통해 지진에너지를 흡수, 분산시키는 개념이다. 면진장치의 한 종류인 납-고무베어링(Lead Rubber Bearing)은 기기나 구조물의 바닥과 기초 사이에 수평운동 및 비틀림에 대하여 저항력이 크고 수직방향 강성(Stiffness)이 매우 큰 베어링(Bearing)을 설치하여 기기나 구조물에 전달되는 지진력을 감소시키는 장치로서 원전기기, 원전구조물에서의 적용을 위하여 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다^(1,2).

* 한전 전력연구원 선임연구원
** 한전 전력연구원 일반연구원, 정회원
*** 한전 전력연구원 책임연구원

본 연구에서는 원전 주제어실의 액세스 플로어에 층면진시스템을 도입하여 지진저감성능을 평가하기 위해서 실물크기의 시험모형을 두 가지 제작하고 각 시험체에 대해서 다양한 입력지진에 대한 진동대 시험을 수행하여 지진응답을 비교하여 분석, 평가하였다.

2. 진동대 실험 개요

2.1 원전주제어실 플로어의 부분모형

액세스 플로어의 부분모형을 2가지 종류로 제작하였다. Type I은 원전 주제어실의 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.

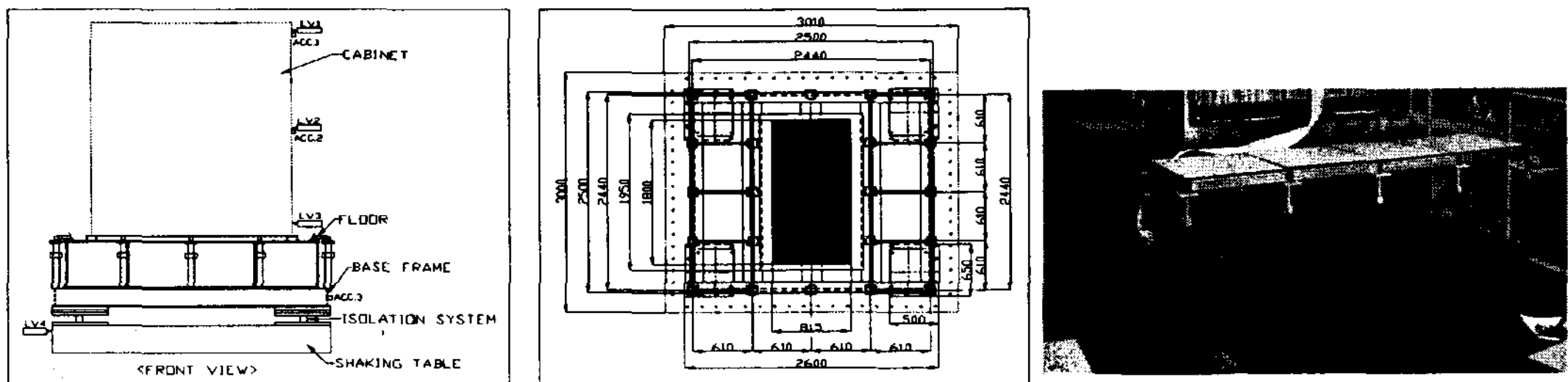


그림 1. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type I

Type II는 주제어실의 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 2.0톤이고, 그림 2에 전체 형태와 크기 그리고 가속도계와 LVDT의 부착위치가 나타나 있다.

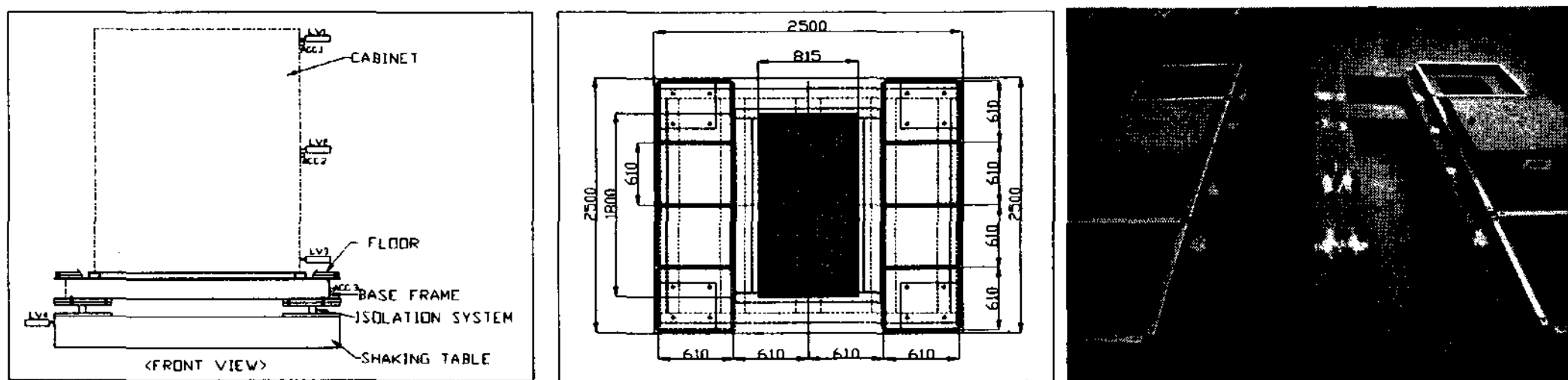


그림 2. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type II

2.2 제어 캐비닛과 LRB의 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.

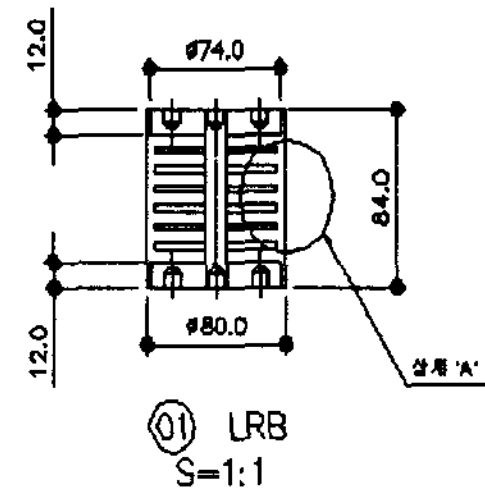
시험에 사용한 면진장치는 납-고무 베어링이고, 고유진동수는 1.5Hz로서 입력지진을 고려하여 결정하였다. 납-고무 베어링의 설계압축하중은 700 kgf이며, 시험체에 사용된 고무의 전단탄성계수는 7.528 kgf/cm², 납의 항복강성은 84.5 kgf/cm²이다. 주요 제원은 표 1에 나타나 있고, 그림 4는 제작한 납-고무 베어링을 나타낸 것이다.



그림 3. PCS 캐비닛



그림 4. 납-고무 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

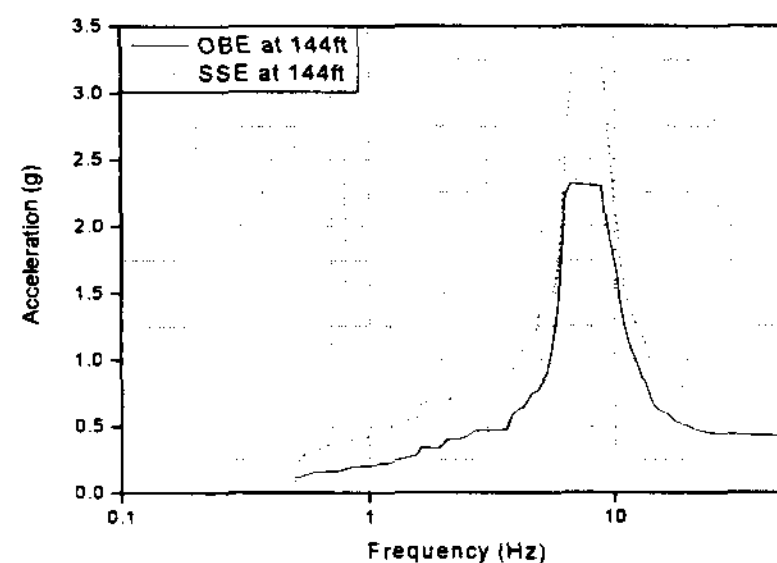


그림 5. 144ft에서의 OBE와 SSE

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(LRB)는 플로어의 네 모서리에 모두 4개를 설치하여 면진장치를 설치하지 않은 경우와 비교하여 실험을 수행하였다.

3. 시험결과 및 분석

시험모형 Type I, Type II에 납-고무 베어링을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 각각 진동대 시험을 수행하였다. 납-고무 베어링을 사용한 층면진시스템은 입력지진의 진동수 성분에 따라서 응답특성이 큰 차이를 나타내었고, 캐비닛의 높이별 최대응답가속도와 캐비닛 중앙부에서 응답스펙트럼을 분석한 결과는 다음과 같다.

3.1 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 분석

캐비닛의 최상부와 중앙부, 하단부에서의 수평방향 최대응답가속도를 그림 6 ~ 그림 8과 표 2에 정리하였다. 전체적인 경향은 El-Centro, Hachinohe, Kobe와 같이 저 진동수에서 최대가속도가 위치하는 지진기록을 사용한 경우(각각 1.8, 1.6, 1.5Hz)에는 가속도 응답이 증폭되어 나타났으며, 상대적으로 고진동수에서 최대가속도가 나타나는 OBE와 SSE의 경우에는 가속도 값이 감소되었다. 이것은 El-Centro 지진과 같이 응답가속도의 첨두값(Peak)이 납-고무베어링의 고유진동수인 1.5Hz 근처에 있는 경우 가속도 응답이 증폭되어 나타난 것으로 판단된다. 따라서 입력지진의 진동수성분에 대해서 충분한 고려가 필요하다고 판단된다.

Type I과의 응답가속도를 비교하여 보면 El-Centro 지진, Hachinohe 지진, Kobe 지진을 입력지진으로 하였을 경우 Type II의 응답가속도가 약간 크거나 비슷한 값을 나타냈지만 OBE와 SSE를 입력지진으로 했을 경우에는 면진시 Type II의 최대가속도응답이 Type I에 비해 10% 정도 적게 나타났다.

표 2. 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 (감쇠율=100% - (면진/비면진)×100%, △: 증폭, ▽: 감쇠)

지진파 (최대가속도, g)	최상부에서의 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	0.633	△-45	0.362	0.573	△-58	0.305	0.516	△-69
	Type II	0.485	0.703	△-44	0.422	0.590	△-39	0.349	0.570	△-67
Hachinohe (0.229)	Type I	0.190	0.338	△-77	0.205	0.266	△-29	0.169	0.246	△-45
	Type II	0.192	0.335	△-74	0.222	0.250	△-12	0.198	0.235	△-18
Kobe (-0.209)	Type I	0.218	0.408	△-87	0.203	0.395	△-94	0.126	0.340	△-169
	Type II	0.183	0.427	△-133	0.228	0.358	△-57	0.196	0.303	△-54
OBE (-0.554)	Type I	2.030	0.311	▽85	1.706	0.262	▽85	0.531	0.239	▽55
	Type II	1.900	0.292	▽85	1.622	0.249	▽85	0.562	0.240	▽58
SSE (-0.753)	Type I	2.680	0.726	▽73	2.362	0.607	▽75	0.731	0.412	▽44
	Type II	2.520	0.618	▽76	2.300	0.426	▽81	0.770	0.354	▽55

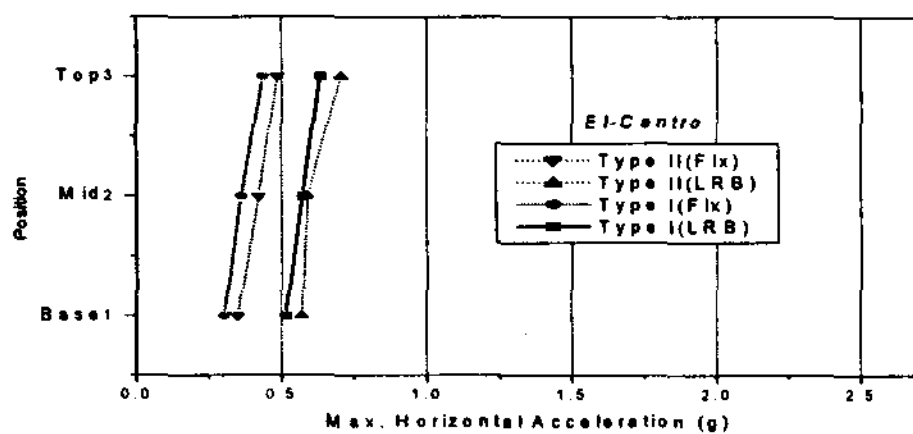


그림 6. 높이별 최대가속도 (El-Centro)

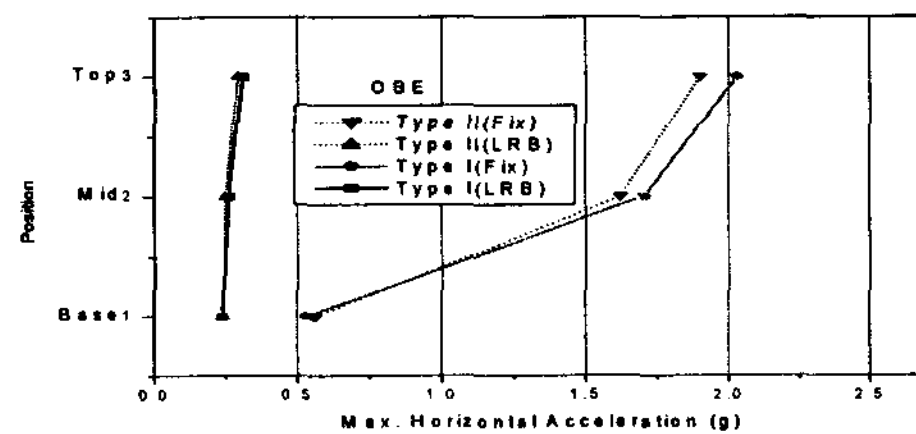


그림 7. 높이별 최대가속도 (OBE)

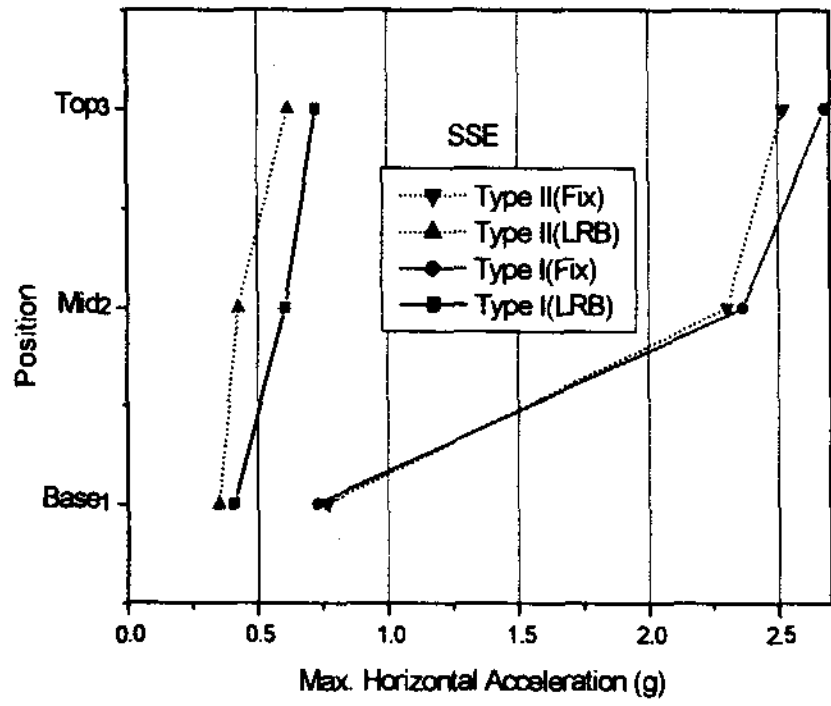


그림 8. 높이별 최대가속도(SSE)

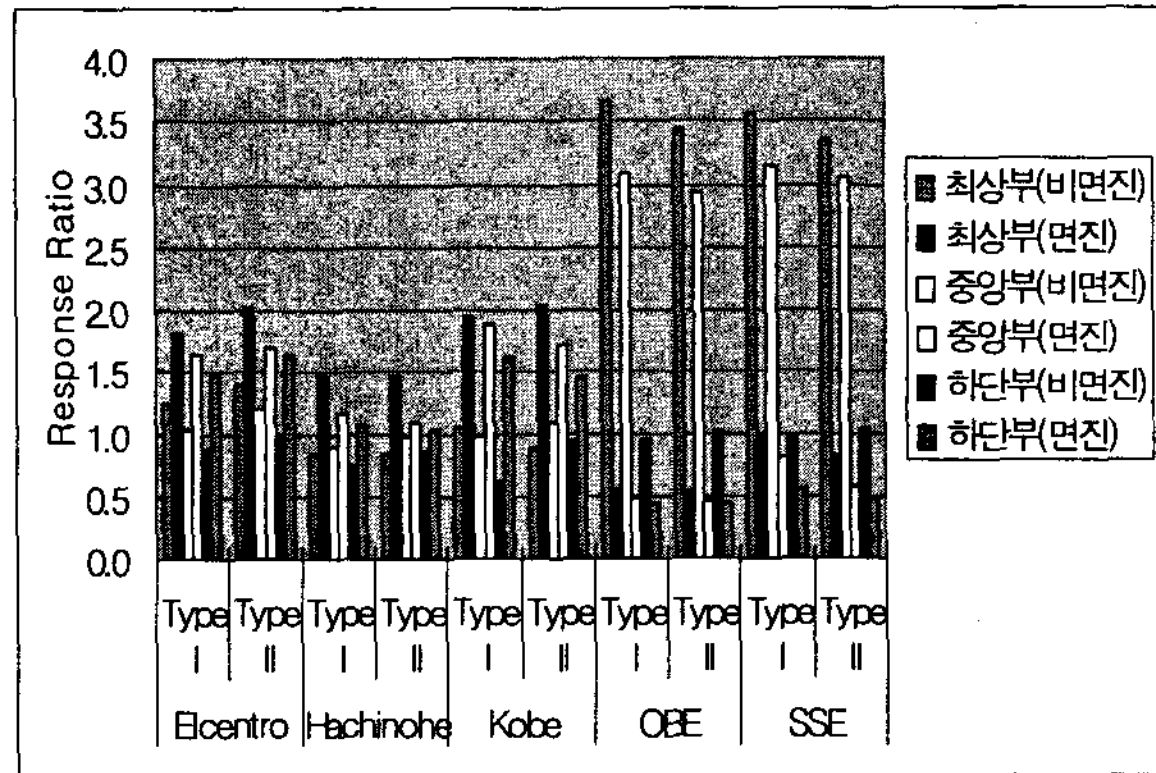


그림 9. 지진별 최대가속도 응답비

3.2 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비 분석

그림 9는 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비를 나타낸 것이다. 입력지진별로 진동대 시험모형 Type I과 Type II의 면진, 비면진시를 비교하여 최대가속도의 응답비(Response Ratio)를 나타냈고, 입력지진동의 최대가속도를 1로 하여 지진응답비를 표시했다.

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

3.3 캐비닛의 시간-가속도 이력 분석

그림 10 ~11은 캐비닛 하단부에서 입력지진별로 진동대 시험모형 Type I, Type II에 대한 시간-가속도 이력을 나타낸 것이다.

(1) Type I

시험모형 Type I의 캐비닛 하단부에서의 시간-가속도 이력은 El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진과 OBE, SSE 경우에 시간-가속도 이력이 구별되는 특성을 보이고 있다(그림 10 참조). El-Centro, Hachinohe, Kobe의 경우에는 가속도 응답이 비면진시 보다 크게 증폭되어 나타나고 있지만, OBE, SSE 입력지진인 경우에는 면진시 응답이 비면진시 응답에 비해 큰 차이를 보이고 면진효과가 크게 나타났다.

(2) Type II

시험모형 Type II의 캐비닛 하단부에서의 시간-가속도 이력은 전체적으로 시험모형 Type I과 유사한 경향을 보여준다(그림 11참조). 이는 위에서도 언급했던 LRB의 고유진동수와 입력지진의 탁월주파수와의 공진현상으로 인한 것으로 생각된다.

전반적으로는 Type I에 비해 Type II의 가속도 응답이 작게 나타났는데 이는 Type I에 비해 Type II의 시험체가 높이가 낮아서 지진 응답이 상대적으로 적게 나타나는 것으로 보인다.

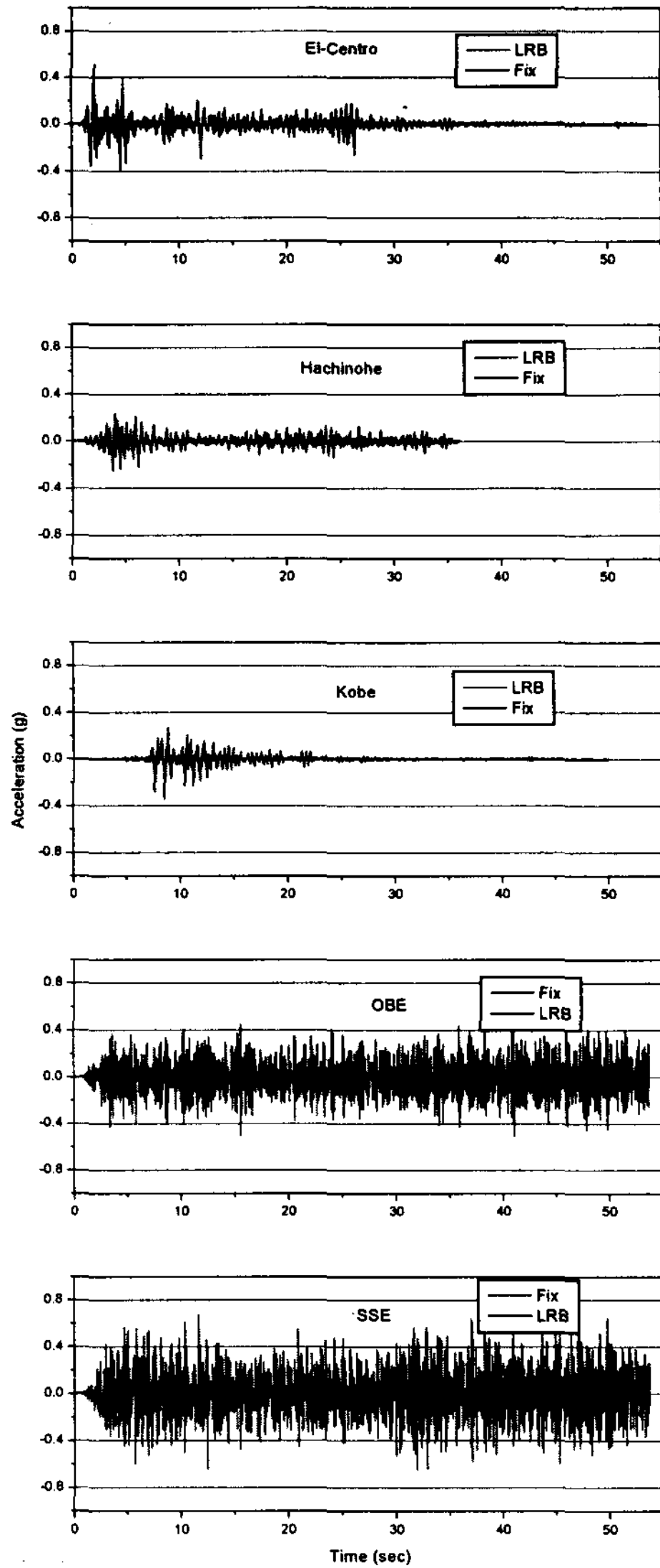


그림 10. 캐비닛 하단부에서의 시간-가속도 이력비교 (Type I)

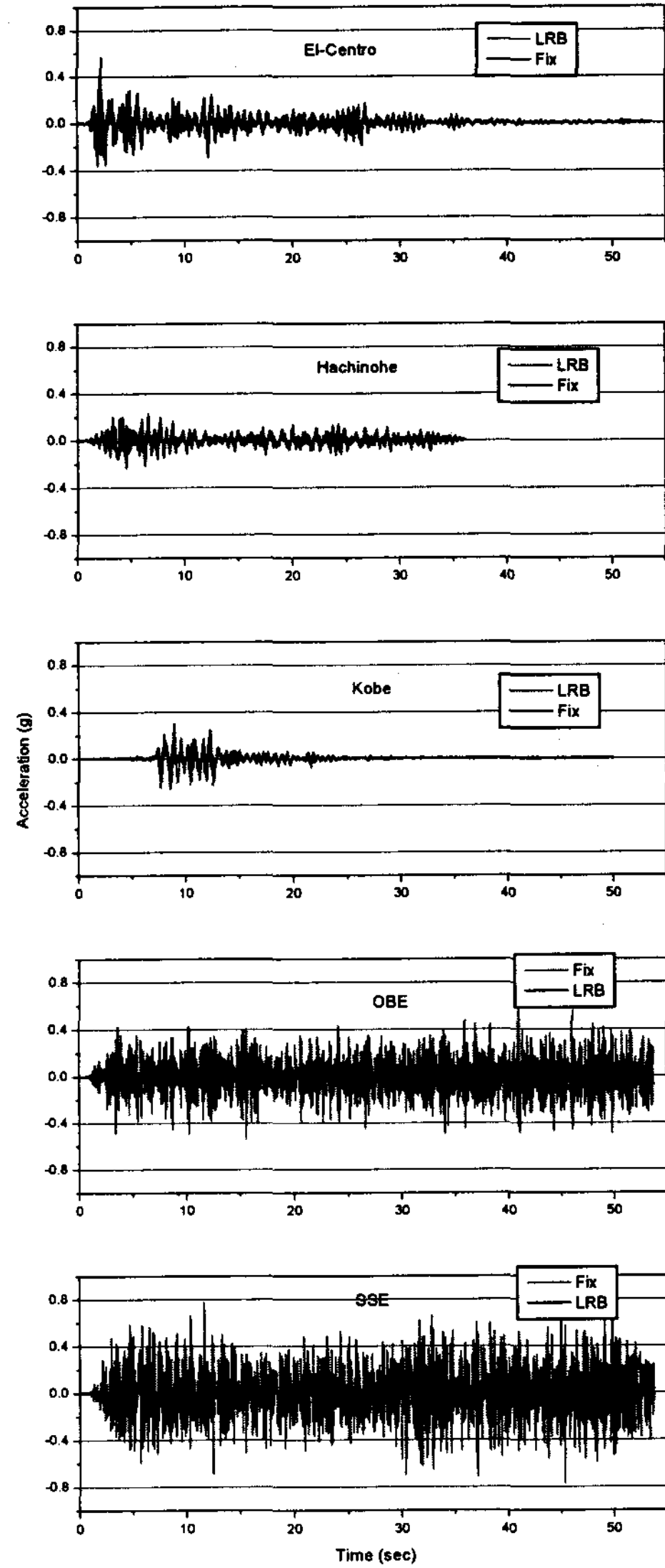


그림 11. 캐비닛 하단부에서의 시간-가속도 이력비교 (Type II)

3.4 캐비닛의 응답 스펙트럼 분석

캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼(Damping 5%)을 그림 12 ~ 13에 나타내었다. 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과, 최대응답이 나타나는 진동수는 납-고무 베어링의 설계진동수에 영향을 많이 받으며, OBE, SSE의 경우는 최대응답이 대폭 저감되었다. Type에 따른 차이는 거의 보이지 않았다.

납-고무 베어링의 설계진동수(1.5Hz)와 비슷한 첨두진동수 값을 갖고 있는 El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진에서는 응답스펙트럼이 증폭되었고, OBE, SSE에서는 지진동 저감효과가 크게 나타나고, 진동수도 설계진동수 부근으로 이동하여 나타났다.

Type I의 경우, OBE나 SSE 지진파를 사용하였을 경우 비면진시 최대응답 진동수가 각각 9.0Hz, 8.5Hz에서 면진시 10.8Hz, 11.0Hz로 이동하였다. 응답 스펙트럼은 OBE인 경우 최대 5.5g에서 1.0g로 저감되었고, SSE인 경우 7.0g에서 0.9g로 저감되었다.

설계진동수 1.5Hz로 설계한 납-고무베어링을 사용하여 층면진을 할 경우 저감특성은 입력지진의 진동수와 최대가속도에 영향을 받고, 전체적으로 응답스펙트럼이 납-고무베어링의 설계진동수 근처에서 첨두값을 보이는 것이 특성이고, 이는 저 진동수에서 고 진동수 범위까지 어느 정도 평활하게 분포하는 마찰진자베어링의 응답과 구별되는 점이다.

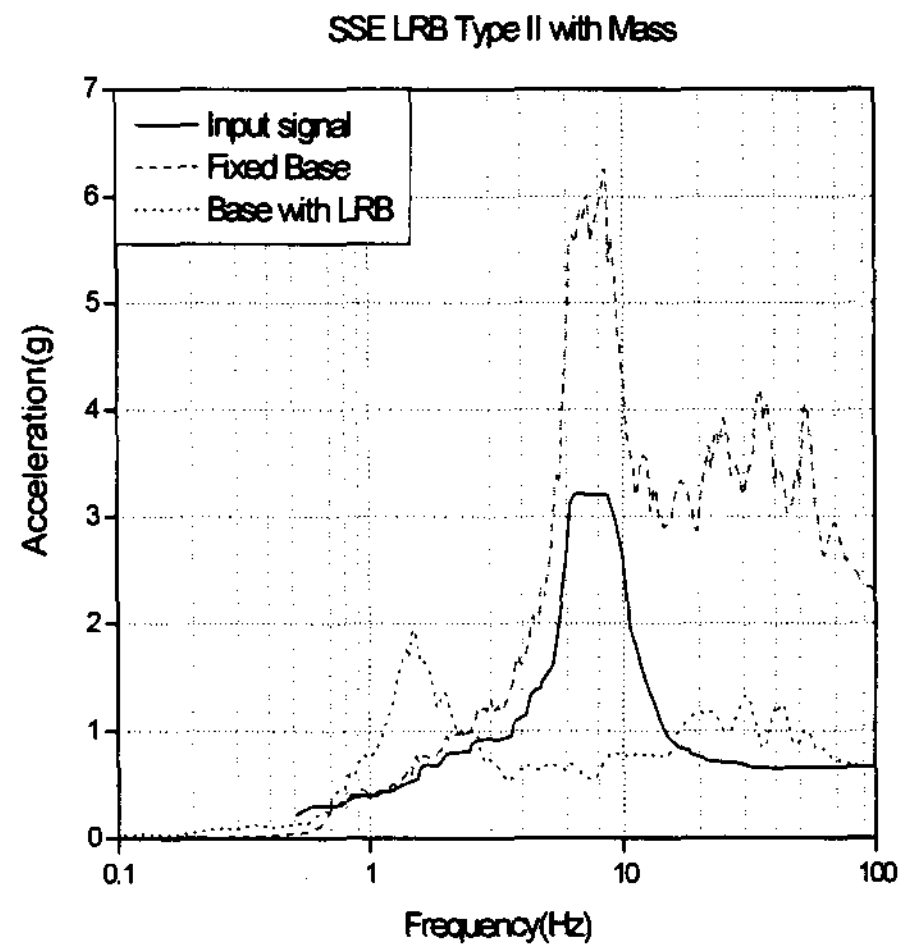
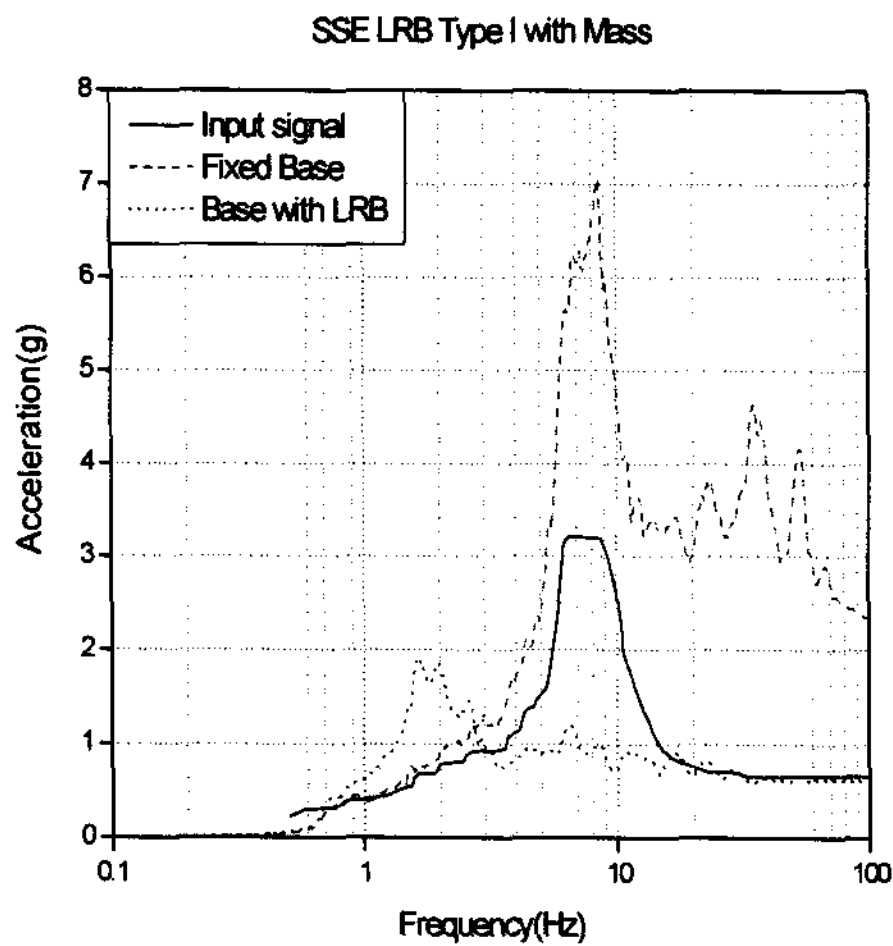
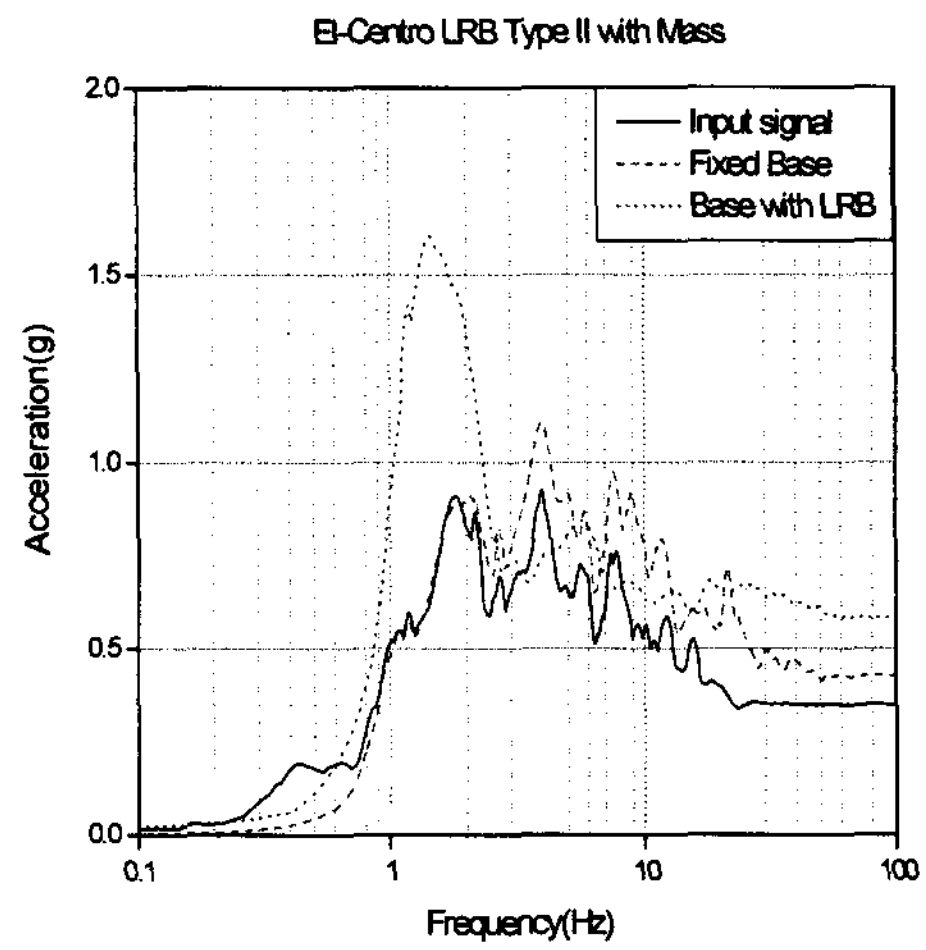
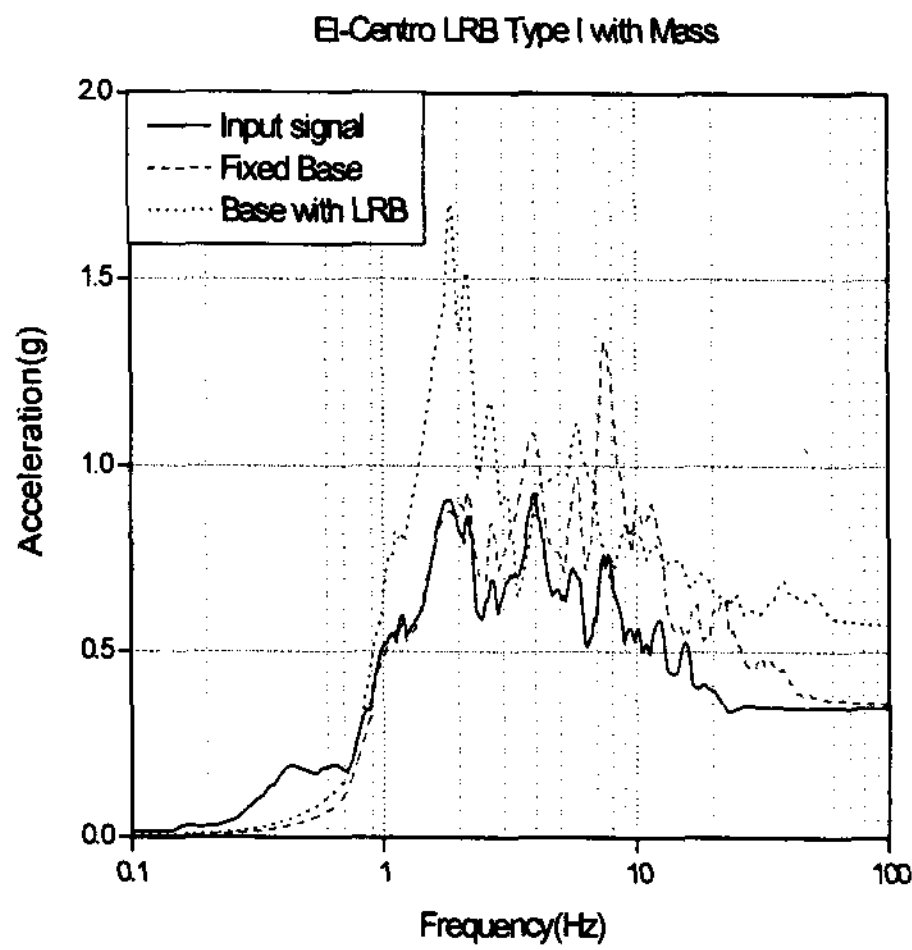


그림 12. 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼 El-Centro, SSE (Type I) 그림 13. 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼 El-Centro, SSE (Type II)

4. 결 론

납-고무베어링을 사용한 층면진시스템의 저감성능을 평가하기 위해 진동대 시험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 최대응답가속도를 비교해 본 결과 Type I과 Type II는 유사한 경향을 보였다. OBE와 SSE의 경우에는 캐비닛 하단부에서 저감이 크게 되며 (저감율 : 44%~58%), El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진은 면진시 응답이 증폭되었다. 이것은 제작한 납-고무베어링의 설계진동수가 1.5Hz 이고, El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진은 1.5Hz 부근에 응답가속도의 첨두값이 존재하기 때문에 가속도 응답이 증폭되어 나타난 것으로 판단된다.
- (2) Type I과 Type II의 시간-가속도응답 이력을 비교해 본 결과, El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진인 경우에는 면진시 응답이 증폭되어 나타나고, OBE, SSE의 경우에는 반대로 면진효과가 크게 나타났다. 전체적으로 Type I에 비해 Type II의 응답이 작게 나타났다.
- (3) 캐비닛 중앙부에서의 응답스펙트럼을 비교한 결과, El-Centro, Hachinohe, Kobe 지진 등의 저진동수 성분이 많은 지진에서는 증폭되어 나타났고, OBE, SSE와 같은 고진동수 성분이 많은 지진에서 지진동 저감효과가 크게 나타났다.
- (4) 납-고무 베어링을 층면진시스템에 적용할 경우 입력지진의 진동수 성분에 대해서 충분한 고려가 필요하다. 납-고무 베어링의 설계진동수를 1.0Hz 이하로 제작하는 것이 필요하지만, 납-고무 베어링에 발생하는 좌굴 때문에 설계진동수를 낮추는 것이 어렵고, 수직재하하중을 작게 제작하기가 어렵기 때문에 소형 납-고무 베어링을 층면진시스템에 사용할 경우에는 신중한 고려가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 기반기금과제인 “원전 주 제어실 지진응답 저감방안연구” 과제의 일부로서 연구비의 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 주 제어실 층면진 기술협의 공무 국외출장보고서”, ‘04 전력연-단717, TC.03NK01.02004. 717, 한국전력공사 전력연구원, 2004. 11.