

원전 주제어실 삼차원 면진시스템 수직방향 저감효과 시험연구

Experimental Study on Vertical Reduction Effectiveness of Main Control Room of NPP using 3-Dimensional Isolation System

함경원*

이경진**

서용표***

Ham, Kyung Won Lee, Kyung Jin Suh, Yong Pyo

ABSTRACT

The seismic characteristics with 3-Dimensional isolation systems have been studied using a shaking table system. In this study, we made nuclear power plant main control room floor systems and several seismic shaking table tests with and without isolation systems were conducted to evaluate floor isolation effectiveness. Isolation systems have showed large reduction effectiveness in acceleration and response spectra with x and z direction respectively, but horizontal isolation is more effective than vertical one. It is required to make isolation systems of which design frequency is below 1Hz when applied to main control room of NPP, but considering much difficulties in making such isolation systems, it is recommended that much consideration should be taken into account when applied to main control room of NPP.

1. 서론

원전 보조건물 EL 144'에 위치하고 있는 주제어실은 지진시 내진 안전성을 확보해야 할 필요가 있으며 이를 위해 주제어실의 액세스 플로어(Access Floor)에 층면진시스템을 도입하여 액세스 플로어 상부기기의 지진응답을 감소시키는 것이 효율적인 방안으로 제안되고 있다.⁽¹⁾ 또한 강화되는 내진설계기준에 대비하여 지진응답을 저감시키기 위한 관련 분야의 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

층면진시스템은 크게 2차원과 3차원 시스템으로 나누어진다. 2차원 층면진시스템에 도입되는

* 한전 전력연구원 일반연구원, 정회원

** 한전 전력연구원 선임연구원, 정회원

*** 한전 전력연구원 책임연구원, 정회원

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⁾

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⁾

마찰진자베어링은 수평방향의 면진에 주로 사용되고, 저진동수 영역의 수직방향 지진응답을 제어하고 저감시키기 위해서는 에어스프링과 댐퍼의 조합이 많이 사용된다. 댐퍼는 에어스프링을 사용하여 발생할 수 있는 과도한 변위를 제어하는 용도로 사용되고 있다.

본 연구에서는 원전 주 제어실내 제어캐비닛의 지진응답을 감소시키기 위해서 캐비닛 하부에 있는 액세스 플로어에 층면진시스템을 도입하여 수직방향 지진저감성능을 평가하였다. 주 제어실 액세스 플로어 실험모형을 제작하고, 제작한 실험체에 대해서 진동대 실험을 수행하여 수직방향 지진응답을 비교하여 분석, 평가하였다. 실험모형에는 수평방향 지진응답을 제어하기 위해 마찰진자 베어링을 설치하고, 수직방향 지진응답을 제어하기 위해서 에어스프링과 댐퍼를 설치하여 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험에 사용한 지진파는 표준원전의 설계기준지진인 운전기준지진(OBE : Operating Basis Earthquake)과 안전정지지진(SSE : Safe Shutdown Earthquake)의 수직방향성분을 입력으로 하여 캐비닛의 지진응답을 평가하였다.

2. 진동대 실험 개요

2.1 원전주제어실 플로어의 실험모형

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-200×200×8×12 부재를 바닥 프레임으로 사용하여 전체 무게는 2.0톤으로 제작하였다.

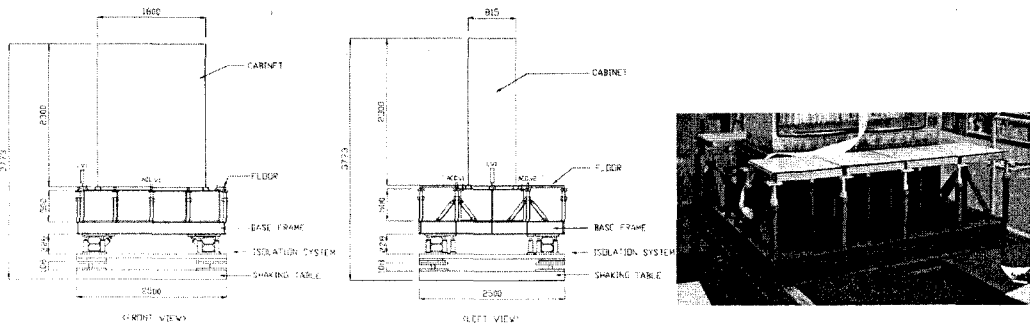


그림 1. 원전주제어실 플로어 모형 Type I

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

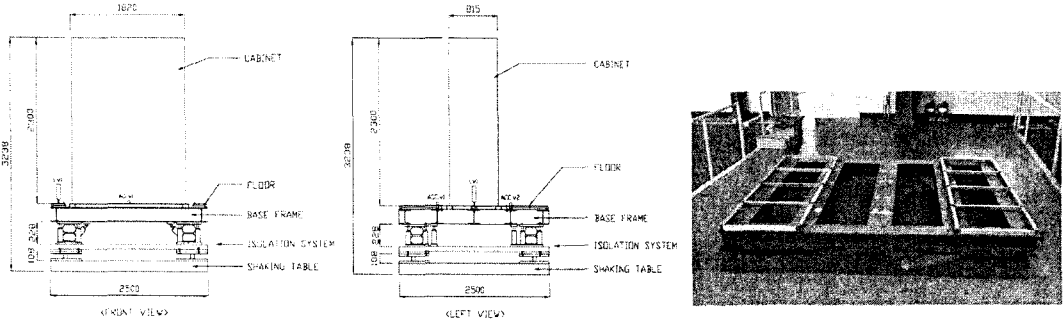


그림 2. 원전 주제어실 플로어 모형 Type II

2.2 제어 캐비닛과 3차원 면진장치의 특성

플로어 실험모형에 부착하여 지진동 응답평가를 하고자 하는 설비는 울진원자력 1, 2호기의 주 제어실에 설치되는 PCS 캐비닛이다(그림 3 참조). 실제 실험 시에는 부속기기는 제거하고 본체를 사용하여 평가를 수행하였고 본체만의 무게는 0.4톤이다.

수평방향 면진장치로 사용한 기기는 마찰진자 베어링이고, 고유진동수는 0.5Hz로서 수평방향 입력지진을 고려하여 결정하였다. 설계압축하중은 2tonf, 곡률반경은 0.99m이다. 곡면의 마찰재 성분은 순수 PTFE(Unfilled PTFE)이고, 마찰재 직경은 40mm, 지압면적은 12.566cm²이다. 그림 4는 제작한 마찰진자 베어링을 나타낸 것이다.

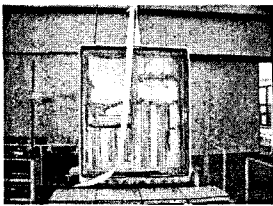


그림 3. PCS 캐비닛

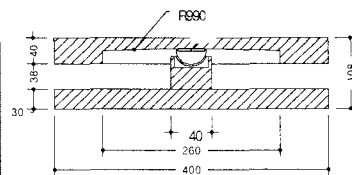
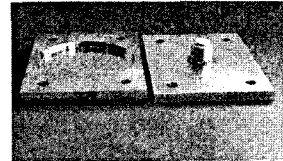


그림 4. 마찰진자 베어링



수직방향 면진장치로 사용한 기기는 에어스프링과 댐퍼이다. 그림 5에 나와 있는 에어 스프링의 수직방향 설계진동수는 2Hz 이고, 수직하중용량은 시험모형의 중량을 고려하여 공기압 52 psi 를 주입했을 때 기준으로 700kgf/ea이다. 에어 스프링을 시험모형에 부착하고 수평방향 가진시 발생하는 Rocking 현상을 줄이기 위해 에어 스프링의 취부(Jig)에 4개의 보호 가이드를 설치하고 보호 가이드 내부벽면에 수직진동 시 마찰을 최소화하기 위해 소형 볼 베어링(Ball Bearing)을 설치하였다.

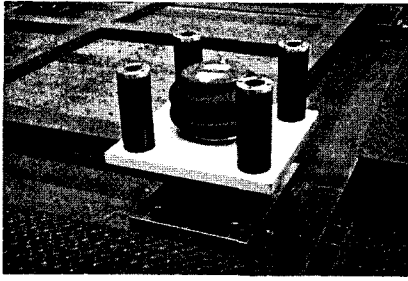


그림 5. 에어 스프링과 취부의 보호가이드

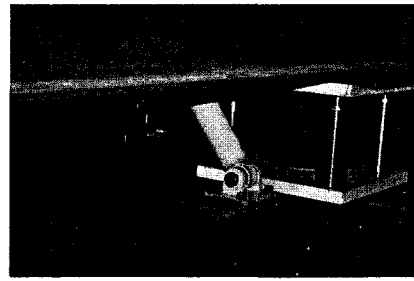


그림 6. 점성 댐퍼 (Viscous Damper)

3차원 층면진시스템에서 크게 문제가 되는 Rocking 현상에 의한 과도한 변위를 제어하기 위하여 점성 댐퍼를 도입하였다. 설계압축하중이 2 tonf, 층변위가 135mm, 설치길이 386mm, 감쇠비 15%, 감쇠계수가 15,000N-sec/m 이다.

수평방향 면진장치인 마찰진자 시스템과 수직방향 면진장치인 에어 스프링이 서로 간에 간섭을 일으키지 않고 각각 독립적으로 작용하게 하기 위하여 하부에 마찰진자 시스템을 설치한 다음, 그 위에 I형 프레임을 설치하고 프레임 상부에 에어 스프링을 설치하여 3차원 층면진시스템을 구성하였다. 또한, 프레임 내부면에는 수평강성 유지를 위하여 + 형으로 격자를 구성하였다.

설치한 I형 프레임의 부재 크기는 100×75×5×8(mm)이고, 크기는 2.3m×2.3m 이며, 설치한 모습을 그림 7에 나타내었다.

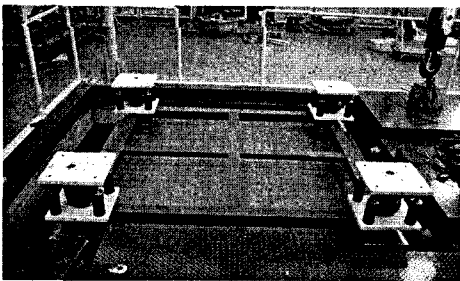


그림 7. 면진장치 사이에 설치한 프레임

표 1. 입력지진과 시험순서

시험체 종류	면진 유무	입력지진	순서
Type I	면진	OBE Z	1
		SSE Z	2
	비면진	OBE Z	3
		SSE Z	4
Type II	면진	OBE Z	5
		SSE Z	6
	비면진	OBE Z	7
		SSE Z	8

2.3 입력 지진파와 실험방법

주제어실 플로어에 3차원 층면진장치를 적용하여 지진동저감성능을 평가하기 위해 층면진장치를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험에 사용한 지진입력은 운전기준지진과 안정정지지진의 144ft에서의 5% 댐핑 층응답스펙트럼을 기준으로 작성하였으며, 지속시간은 80초이며, 최대가속도는 각각 0.389g, 0.734g 이다. 표 1에 입력 지진파의 종류와 시험순서를 요약하였으며 그림 8에 주제어실이 위치한 원전 보조건물 144ft에서의 운전기준 지진과 안전정지지진의 층응답스펙트럼(FRS : Floor Response Spectrum)을 나타내었고, 그림 9 ~ 그림 10에 시간-가속도 이력을 나타내었다.

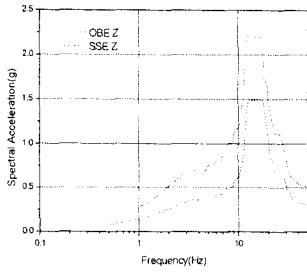


그림 8. OBE,SSE
층 응답스펙트럼

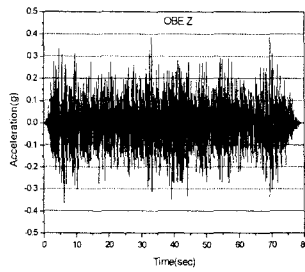


그림 9. 운전기준지진
시간-가속도 이력

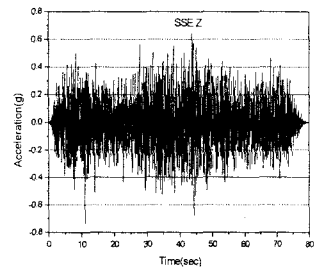


그림 10. 안전정지지진
시간-가속도이력

2.4 면진장치 지진저감성능 평가실험

캐비닛의 응답을 계측하기 위하여 그림 1~ 그림2에 표시한 것처럼 가속도 센서와 LVDT를 캐비닛과 액세스 플로어에 2개, LVDT를 1개 설치하였고, 면진장치는 플로어의 네 모서리에 모두 4개를 설치하여 면진장치를 설치하지 않은 경우와 비교하여 진동대 실험을 수행하였다.

3. 진동대 실험결과 및 분석

실험모형에 면진장치를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 각각 진동대 실험을 수행하여 캐비닛 하단부에서의 최대응답가속도와 가속도 응답스펙트럼을 비교, 분석한 결과는 다음과 같다

3.1 캐비닛 하단부 최대응답가속도 분석

캐비닛의 하단부에서의 수직 방향 최대응답가속도를 표 2에 정리하였다. 면진장치를 설치한 플로어의 최대응답가속도 감소율이 62~79% 수준으로 나타났으며, Rocking으로 인한 캐비닛 좌우의 가속도 차이는 크게 발생하지 않았다. 또한 시험모형 Type 에 따른 가속도 차이도 미비하게 나타났다. (감소율 = 100% - 면진/비면진×100%)

표 2. 캐비닛의 최대응답가속도(수직방향)

지진파		캐비닛 하단부 좌측 최대가속도			캐비닛 하단부 우측 최대가속도		
		비면진	면진	감소율	비면진	면진	감소율
OBE	Type I	0.474	0.165	▽65	0.448	0.171	▽62
	Type II	0.488	0.139	▽72	0.466	0.156	▽67
SSE	Type I	0.786	0.179	▽77	0.775	0.165	▽79
	Type II	0.763	0.278	▽63	0.748	0.262	▽65

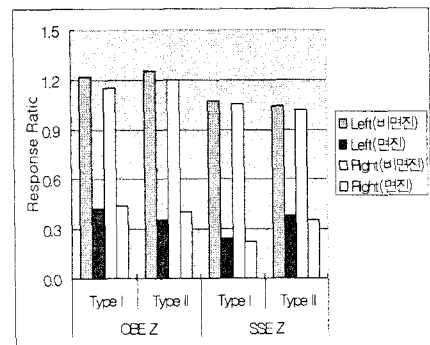


그림 11. 수직방향 최대가속도 응답비

3.2 캐비닛 하단부 최대가속도 응답비 분석

그림 11은 캐비닛 하단부 좌측, 우측의 최대가속도 응답비(Response Ratio)를 나타낸 것으로서 입력지진동의 최대가속도를 1로 하여 비교하였다. Type I, II 모두 0.5 이하의 최대가속도 응답비를 보여주고 있으며, 좌우에 따른 가속도 응답비도 비슷한 수준을 보여주었다.

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

3.3 캐비닛의 응답 스펙트럼 분석

캐비닛 하단부에서 좌측, 우측 응답스펙트럼(Damping 5%)의 평균값을 그림 12 ~ 그림 15에 나타내었다. Type I의 경우 최대응답이 발생하는 진동수가 저진동수 영역으로 이동하였으며, 최대응답 또한 저감되었다. Type II의 경우 최대응답 발생 진동수가 에어스프링의 고유진동수 부근인 3.0Hz 진동수 영역으로 이동하였다.

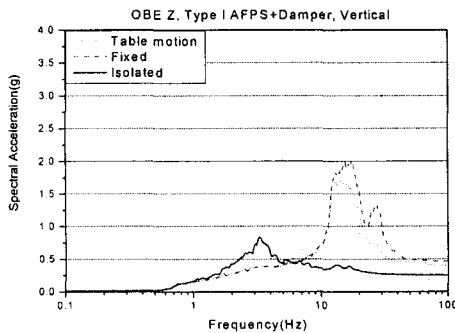


그림 12. 수직방향 응답스펙트럼비교 (OBE, Type I)

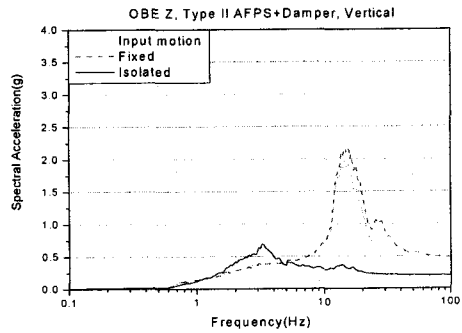


그림 13. 수직방향 응답스펙트럼비교 (OBE, Type II)

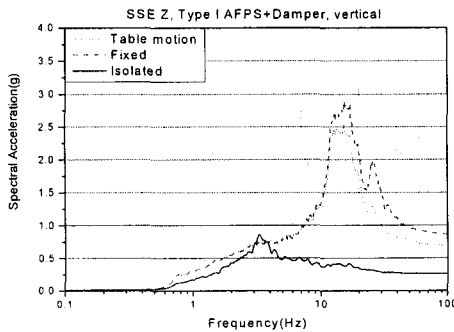


그림 14. 수직방향 응답스펙트럼비교 (SSE, Type I)

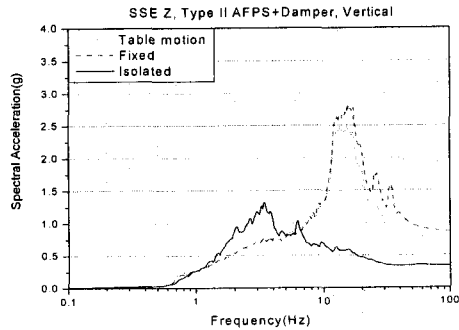


그림 15. 수직방향 응답스펙트럼비교 (SSE, Type II)

4. 결 론

주제어실 시험모형 Type I과 Type II에 3차원 층면진시스템을 설치하고, 수직방향 진동대 시험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 수직방향의 최대응답가속도를 비교해 본 결과, 면진장치를 설치하지 않은 경우에 비해 최대 가속도가 79% 정도 감소되었으며, Rocking으로 인한 캐비닛 좌우의 가속도 차이는 크게 발생하지 않았다. 또한 시험모형 Type에 따른 가속도 차이도 미비하게 나타났다.
- (2) 캐비닛 하단부 좌우의 최대가속도 응답비를 살펴본 결과, Type I, II 모두 0.5 이하의 가속도 응답비를 보여주었다.
- (3) 캐비닛 하단부 좌,우 가속도 응답스펙트럼의 평균값을 비교한 결과, 54% ~ 71% 정도의 지진응답 저감효과를 나타내었으며, 최대응답이 발생하는 진동수 영역이 에어스프링의 고유진동수 대역으로 이동하였다.

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.