

원전 주제어실 3차원 층면진시스템의 진동대 실험 연구

Shaking Table Test Study on 3-Dimensional Floor Isolation of Main Control Room of Nuclear Power Plant

이경진* 함경원** 서용표*** 윤현도****
Lee, Kyung Jin Ham, Kyung Won Suh, Yong-Pyo Yoon, Hyun-Do

ABSTRACT

The seismic characteristics with 3-Dimensional Floor Isolation 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 3-Dimensional Floor Isolation Effectiveness. 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, 계측기를 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 있다.

제어실이나 컴퓨터실 바닥의 층면진에 관련된 연구로는 Lambrou 와 Constantinou가 일반컴퓨터 주제어실의 지진응답을 저감시키기 위해 실험연구를 수행한 사례가 있다⁽¹⁾.

Lambrou와 Constantinou는 컴퓨터 주제어실의 액세스 플로어 하부에 I형 강재로 프레임을 설치하여 프레임에 슬라이딩 베어링과 마찰 베어링, 액체 점성 댐퍼(Fluid Viscous Damper)를 따로 설치하여 비교실험연구를 수행하였다.

일본의 원자력안전기반기구(JNES)에서는 지진시에 원전 컴퓨터시스템의 구조, 강도 및 기능의 건전성 평가와 내진여유도를 확인하기 위하여 층면진 시스템을 적용하여 원전 컴퓨터시스템의 진동대 실증실험을 수행하였다⁽²⁾.

* 한전 전력연구원 선임연구원, ** 한전 전력연구원 연구원
*** 한전 전력연구원 책임연구원, **** 충남대 건축공학과 교수

본 연구에서는 원전 주 제어실의 액세스 플로어(Access Floor)에 개발한 3차원 층면진시스템을 도입하여 지진저감성을 실험연구를 통하여 평가하였다. 실험연구를 위하여 실물크기의 액세스 플로어 실험모형을 두 가지 제작하고 원전설계지진을 입력지진으로 하여 실험모형에 따른 지진동 저감특성과 3차원 층면진 시스템의 설치 유무에 따른 지진동 저감특성을 진동대 실험을 통하여 파악하였다.

2. 진동대 실험

2.1 실험체 설계 및 제작

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.

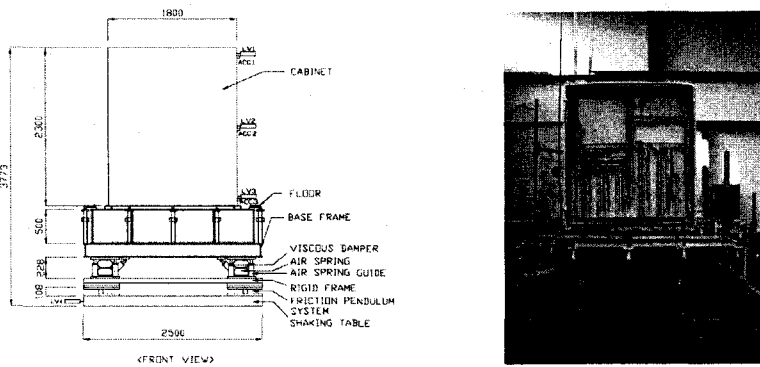


그림 1. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type I

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.

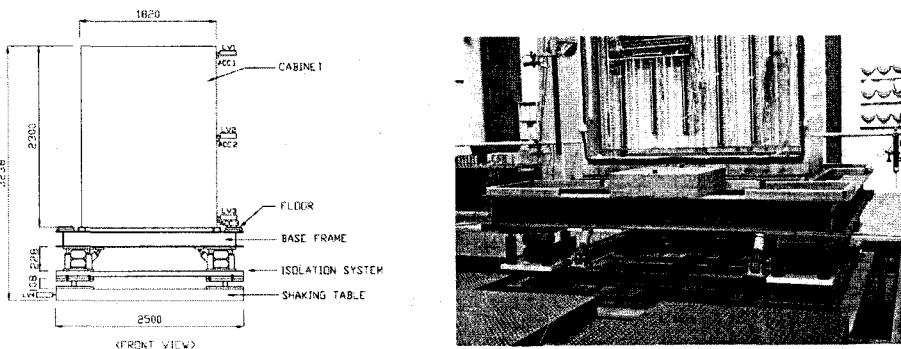


그림 2. 원전주제어실 플로어 시험모형 Type II

2.2 제어 캐비닛과 3차원 면진장치의 특성

플로어 실험모형 Type I, II에 부착하여 지진동 응답평가를 하고자 하는 실험설비는 울진원자력

1, 2호기의 주제어실에 설치되는 PCS 캐비닛이다(그림 3 참조). 실제 실험 시에는 부속기기는 제거하고 본체를 사용하여 평가를 수행하였고 본체만의 무게는 0.4톤이다.

실험에 사용한 3차원 면진장치는 마찰진자 베어링과 에어 스프링, 댐퍼를 조합하여 구성하였다. 마찰진자 베어링은 수평방향 면진장치로 구성하였고, 수평방향 설계진동수는 0.5Hz로서 입력지진을 고려하여 결정하였다. 설계압축하중은 2tonf, 곡률반경은 0.99m이다. 에어 스프링은 수직방향 면진장치로서 수직방향 설계진동수는 2Hz이고, 수직하중용량은 시험모형의 중량을 고려하여 공기압 52psi를 주입했을 때 기준으로 700kg/ea.이다.

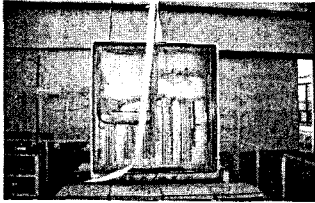


그림 3. PCS 캐비닛

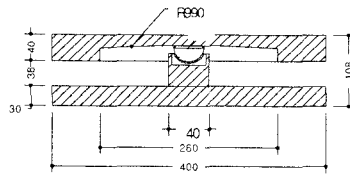
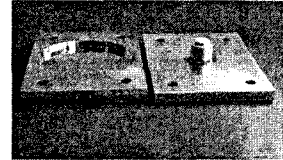


그림 4. 마찰진자 베어링



3차원 층면진 시스템에서 크게 문제가 되는 점은 실험모형에 수평방향과 수직방향 지진동이 동시에 가진될 때, 실험모형이 가진 방향과 수직방향으로 흔들리는 Rocking 현상이 발생하고, 이로 인해 과도한 변위가 발생하는 점이다. 이러한 변위를 제어하기 위하여 본 실험에서는 여러 가지 예비실험을 통해서 성능을 평가한 점성 댐퍼를 도입하여 수평/수직방향 가진에 의한 변위를 제어하고자 하였다.

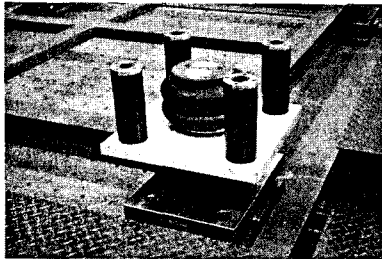


그림 5. 에어스프링

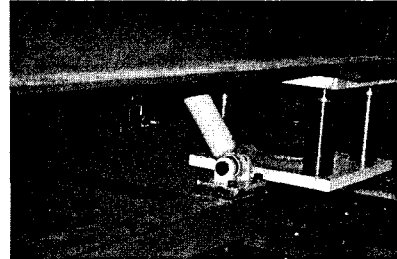


그림 6. 점성 댐퍼

2.3 입력 지진파와 실험방법

주제어실 플로어에 층면진장치를 적용하여 지진동저감성능을 평가하기 위해 Type I, Type II 모형을 실규모 부분모형으로 설계, 제작하여 층면진장치를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험에 사용한 지진입력은 표준원전 설계응답 스펙트럼인 운전 기준지진(OBE), 안전정지지진(SSE) 스펙트럼 수평방향 성분과 수직방향 성분에서 생성한 시간-가속도 이력을 입력지진으로 하여 특성평가를 수행하였다.

지진동 저감성능 평가실험에 사용한 입력지진은 그림 7 ~ 그림 8에 나타난 바와 같이 국내표준원전의 E1.144'에서의 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE)의 수평방향성분과 수직방향성분을 사용하였으며, 그림 9~ 그림 10은 입력지진의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 두 지진을 입력지진으로 사용한 이유는 본 연구가 원전 주제어실의 층면진 시스템을 개발하는 실험연구로서, 원전 주제어실이 위치한 E1.144'에서의 층응답스펙트럼을 입력지진으로 하였을 경우의 응답특성이 중요하기 때문이다.

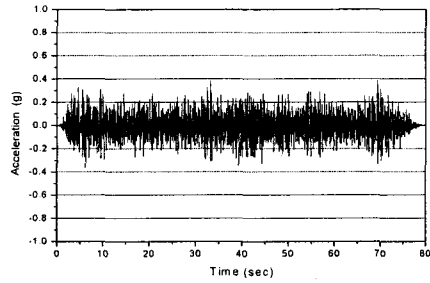
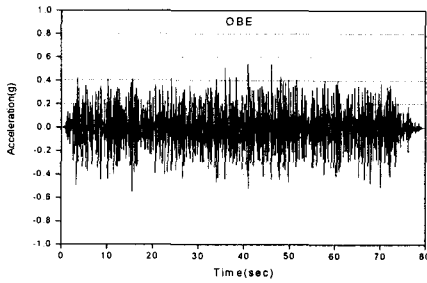


그림 7. 운전기준지진(OBE)의 시간-가속도 이력 (수평방향, 수직방향)

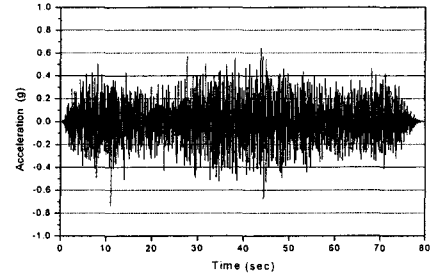
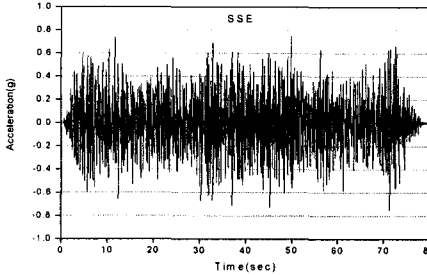


그림 8. 안전정지지진(SSE)의 시간-가속도 이력 (수평방향, 수직방향)

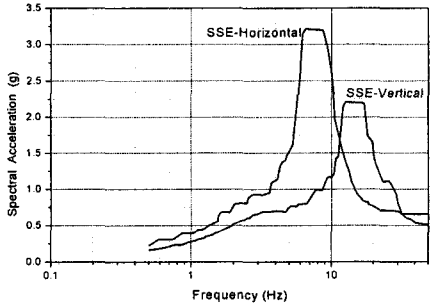
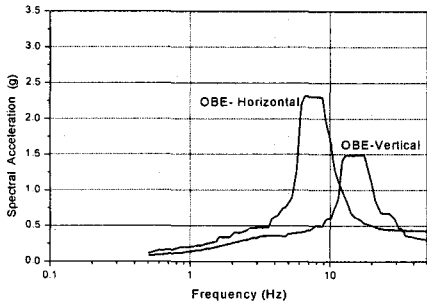


그림 9. 운전기준지진의 응답스펙트럼

그림 10. 안전정지지진의 응답스펙트럼

3. 실험 결과 및 분석

원전 설계지진인 운전기준지진과 안전정지지진을 수평방향과 수직방향으로 동시에 가진하였을 경우, 시험모형 Type I, Type II 각각에 대해서 최대응답가속도와 응답변위 그리고 응답스펙트럼을 중심으로 하여 응답특성을 정리하여 분석하였다.

3.1 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 분석

주제어실 시험모형에 3차원 층면진 시스템을 설치하고, 수평/수직 3축방향으로 동시 가진했을 경우 실험모형에 있는 주제어실 캐비닛의 높이별 최대응답가속도의 실험결과는 다음과 같다. 진동대 실험을 수행하여 수평방향 최대응답가속도와 수직방향 최대응답가속도를 나누어서 정리하였고, 각각에 대하여 3차원 층면진된 시스템과 면진장치가 없는 시스템을 비교하여 분석하였다.

가) 실험모형 Type I

운전기준지진에 대한 시험모형 Type I의 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 면진시

의 응답(0.111g)이 비면진시의 응답(0.785g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 77%(1.055g→0.240g) 저감되었다. 안전정지지진에 대한 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 면진시의 응답(0.114g)이 비면진의 응답(0.841g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 87%(1.887g → 0.242g) 저감되었다(표 1 참조)

실험모형 Type I의 수직방향 응답가속도는 캐비닛 하단부의 좌측과 우측에서 시험자료를 계측하였다. 운전기준지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 면진시의 응답(0.211g)이 비면진의 응답(0.461g)에 비해 54% 저감되고, 우측에서는 64%(0.433g→0.157g) 저감되었다.

안전정지지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 면진시의 응답(0.326g)이 비면진시의 응답(0.768g)에 비해 56% 저감되고, 우측에서는 64%(0.721g→0.262g) 저감되었다.

나) 실험모형 Type II

운전기준지진에 대한 시험모형 Type II의 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 면진시의 응답(0.140g)이 비면진시의 응답(0.560g)에 비해 75% 저감되고, 최상부에서는 81%(0.977g→0.184g) 저감되었다. 안전정지지진에 대한 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 면진시의 응답(0.104g)이 비면진의 응답(0.732g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 91%(1.859g → 0.165g) 저감되었다.

실험모형 Type II의 운전기준지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 면진시의 응답(0.182g)이 비면진의 응답(0.452g)에 비해 60% 저감되고, 우측에서는 69%(0.431g→0.134g) 저감되었다.

안전정지지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 면진시의 응답(0.303g)이 비면진시의 응답(0.784g)에 비해 61% 저감되고, 우측에서는 66%(0.737g→0.249g) 저감되었다.

표 1. 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 (수평방향)

| 지진과 | 최상부에서의 최대가속도(g) | | | 중앙부에서의 최대가속도(g) | | | 하단부에서의 최대가속도(g) | | | |
|-----|-----------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|-----|
| | 비면진 | 면진 | 저감율(%) | 비면진 | 면진 | 저감율(%) | 비면진 | 면진 | 저감율(%) | |
| OBE | Type I | 1.055 | 0.240 | ▽77 | 1.035 | 0.175 | ▽83 | 0.785 | 0.111 | ▽86 |
| | Type II | 0.977 | 0.184 | ▽81 | 1.357 | 0.162 | ▽88 | 0.560 | 0.140 | ▽75 |
| SSE | Type I | 1.887 | 0.242 | ▽87 | 1.626 | 0.210 | ▽87 | 0.841 | 0.114 | ▽86 |
| | Type II | 1.859 | 0.165 | ▽91 | 1.804 | 0.134 | ▽92 | 0.732 | 0.104 | ▽86 |

표 2. 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 (수직방향)

| 지진과 | 캐비닛 하단부 좌측에서의 최대가속도(g) | | | 캐비닛 하단부 우측에서의 최대가속도(g) | | | |
|-----|------------------------|-------|--------|------------------------|-------|--------|-----|
| | 비면진 | 면진 | 저감율(%) | 비면진 | 면진 | 저감율(%) | |
| OBE | Type I | 0.461 | 0.211 | ▽54 | 0.433 | 0.157 | ▽64 |
| | Type II | 0.452 | 0.182 | ▽60 | 0.431 | 0.134 | ▽69 |
| SSE | Type I | 0.768 | 0.326 | ▽56 | 0.721 | 0.262 | ▽64 |
| | Type II | 0.784 | 0.303 | ▽61 | 0.737 | 0.249 | ▽66 |

3.2 캐비닛의 높이별 최대응답 상대변위 분석

운전기준지진과 안전정지지진을 수평방향과 수직방향으로 동시에 가진하였을 경우, 실험모형 Type I, Type II 각각에 대해서 캐비닛의 상단부, 중앙부, 하단부에서 면진시스템을 설치하지 않

은 경우와 설치한 경우에 대하여 최대응답 상대변위를 분석한 결과는 다음과 같다.

표 3은 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것이다. 수평방향 최대상대변위는 캐비닛의 하단부에 대한 상대변위를 나타낸 것으로서 캐비닛 중앙부와 상단부에서는 비면진시에 비해 면진시 변위가 상대적으로 줄어들지만 하단부에서는 면진장치의 특성상 상대변위가 크게 증가하여 나타났다.

표 3. 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위

| 지진과 | 최상부의 하단부에 대한 최대상대변위 (mm) | | 중앙부의 하단부에 대한 최대상대변위 (mm) | | 하단부의 진동대 테이블에 대한 최대상대변위 (mm) | | |
|-----|--------------------------|------|--------------------------|------|------------------------------|-------|--------|
| | 비면진 | 면진 | 비면진 | 면진 | 비면진 | 면진 | |
| OBE | Type I | 7.54 | 4.25 | 4.61 | 2.2 | 0.933 | 1.919 |
| | Type II | 8.24 | 1.42 | 5.75 | 0.47 | 0.853 | 3.49 |
| SSE | Type I | 6.5 | 4.57 | 5.14 | 3.38 | 1.59 | 18.994 |
| | Type II | 4.33 | 4.01 | 3.11 | 2.02 | 0.255 | 25.62 |

표 4는 캐비닛의 수직방향 최대변위를 나타낸 것으로서 비면진에 비해 면진시 수직방향 변위는 어 스프링의 영향 때문에 큰 값을 나타내고 있다.

표 4. 입력지진에 대한 캐비닛의 수직방향 최대변위

| 지진과 | 하단부의 수직방향 최대변위(mm) | |
|-----|--------------------|-------|
| | 비면진 | 면진 |
| OBE | Type I | 22.84 |
| | Type II | 31.92 |
| SSE | Type I | 37.27 |
| | Type II | 50.54 |

그림 11은 운전기준지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것으로서, 하단부의 변위에 대한 상대변위를 표현한 것이다. 상대변위는 시험모형 Type II에 층면진시스템을 설치했을 경우가 작게 나타났다. 그림 12는 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것으로서, 상대변위가 시험모형 Type II에 층면진시스템을 설치했을 경우가 작게 나타났고, 시험모형 Type I에 층면진시스템을 설치한 경우에 상대변위는 조금 크게 나타났다.

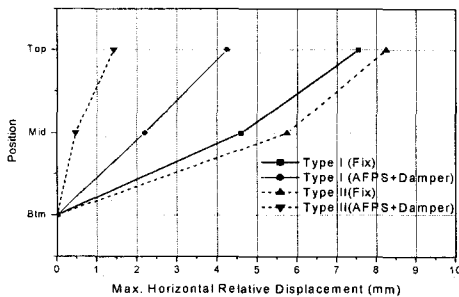


그림 11. 운전기준지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위

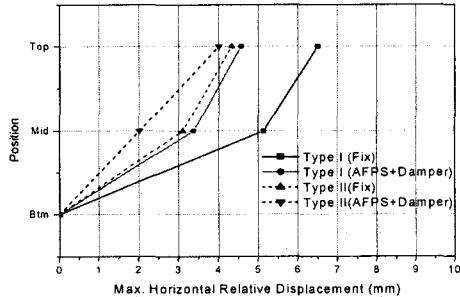


그림 12. 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위

3.3 캐비닛의 응답 스펙트럼 분석

운전기준지진과 안전정지지진을 입력지진으로 하여 시험모형 Type I, Type II에 대하여 캐비닛에서 위치별로 수평방향 응답스펙트럼과 수직방향 응답스펙트럼을 그림 13 ~ 그림 16에 나타내

었다. 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 면진장치를 설치한 경우 저진동수 영역으로 이동하였고, 최대응답은 면진장치를 설치한 경우 크게 저감되었다.

가) 실험모형 Type I

그림 13 ~ 그림 14는 입력지진을 안전정지지진으로 하여 면진시 응답스펙트럼과 비면진시 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 그림이다.

하단부에서 비면진시의 응답은 진동대의 운동과 비슷한 응답을 나타내고, 주 진동수는 7~9Hz 근처에 위치해 있다. 면진시 응답은 주진동수 대역이 1.0Hz 근처로 이동하고 최대응답스펙트럼 가속도는 비면진시 3.5g, 면진시 0.43g 로서 87% 저감되었다.

캐비닛 하단부에서 측정한 수직방향 응답스펙트럼은 그림 14에 나타나 있다. 비면진시 최대응답 스펙트럼 가속도가 3.0g(진동수 10.8Hz), 면진시 1.25g(진동수 3.3Hz)로서 58% 저감되었다.

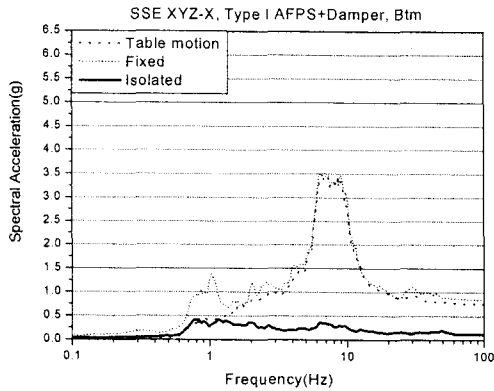


그림 13. 시험모형 Type I의 안전정지지진 가진 시 수평방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)

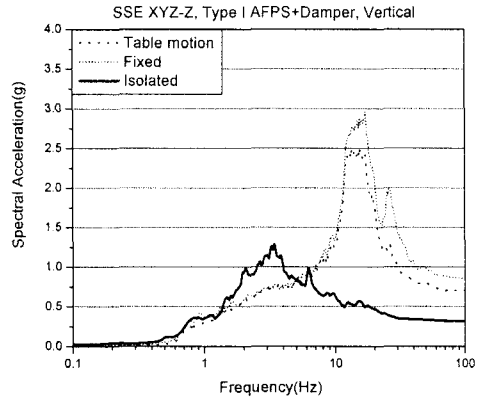


그림 14. 시험모형 Type I의 안전정지지진 가진 시 수직방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)

나) 시험모형 Type II

그림 15 ~ 그림 16은 입력지진을 안전정지지진으로 하여 면진시 응답스펙트럼과 비면진시 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 그림이다.

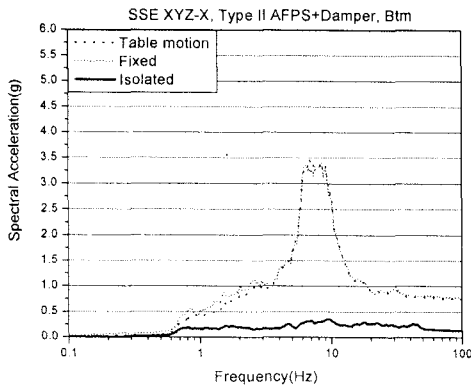


그림 15. 시험모형 Type II의 안전정지지진 가진 시 수평방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)

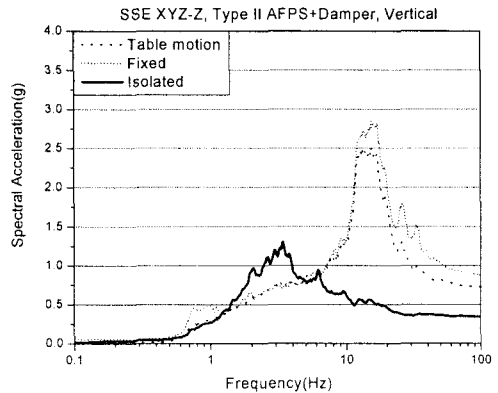


그림 16. 시험모형 Type II의 안전정지지진 가진 시 수직방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)

캐비닛 하단부에서 비면진시의 응답은 주 진동수가 7~9Hz 근처에 위치해 있다. 면진시 응답은 주진동수 대역이 특정 진동수 대역이 보이지 않고, 최대응답스펙트럼 가속도는 비면진시 3.4g, 면진시 0.4g 로서 88% 저감되었다.

캐비닛 하단부에서 측정된 수직방향 응답스펙트럼은 비면진시 최대응답스펙트럼 가속도가 2.8g(진동수 10.8Hz), 면진시 1.30g(진동수 3.3Hz)로서 53% 저감되었다.

4. 결 론

원전 주제어실 실험모형에 3차원 층면진 시스템을 적용하여 저감성능을 평가하기 위해 진동대 실험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 가) 운전기준지진과 안전정지지진에 대한 실험모형 Type I, Type II의 캐비닛에서의 높이별 최대응답가속도는 층면진 시스템을 설치했을 경우 실험모형 Type II가 실험모형 Type I에 비해 캐비닛의 위치별로 10~30% 정도 가속도 응답이 작게 나타나서 응답특성이 우수한 것으로 나타났다.
- 나) 안전정지지진에 대한 실험모형 Type I, Type II의 캐비닛에서의 높이별 상대변위는 실험모형 Type II가 실험모형 Type I에 비해 10%정도 작게 나타났다.
- 다) 안전정지진에 대한 실험모형 Type I, Type II의 캐비닛 하단부에서의 최대응답스펙트럼 가속도가 실험모형 Type II가 실험모형 Type I에 비해 20% 정도 작게 나타나서 우수한 저감 특성이 보였다.
- 라) 수평/수직방향 입력지진을 동시에 제어하는 층면진 시스템은 진동대 실증시험결과 우수한 지진저감특성을 나타냈고, 실험모형 차이에 따른 저감특성은 시험모형 Type II가 보다 더 우수한 지진저감 특성을 나타냈다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. V. Lambrou and M.C. Constantinou, " Study of Seismic Isolation Systems for Computer Floors", Technical Report NCEER-94-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, July, 1994.
2. 일본 원자력공학시험센터, “원자력발전시설 신뢰성실증시험의 현황”, 1989.
3. K. Ebisawa, K. Ando, K. Shibata, "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," Nuclear Engineering and Design 198, pp.61~74, 2000.
4. 김민규, 전영선, 최인길, 서정문, “면진장치를 이용한 원전기기의 내진성능 분석”, KAERI/TR-2765/2004, 한국원자력연구소, 2004. 5.
5. 김영중, 허영철, 김병현, “마찰진자형 면진베어링의 특성연구”, 한국지진공학회 2000년도 추계 학술대회 논문집, pp.407-414, 2000.
6. 이경진, 김갑순, 서용표, “FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가”, 한국지진공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 2003.
7. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철림, “적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호(통권 제8호), pp.53~62, 1998. 12.