

원전 주제어실 3차원 층 지진격리시스템의 진동대 실험 연구

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

이경진¹⁾ · 함경원²⁾ · 서용표³⁾ · 윤현도⁴⁾

Lee, Kyung-Jin · Ham, Kyung-Won · Suh, Yong-Pyo · Yoon, Hyun-Do

국문 요약 >> 본 연구에서는 원전 주제어실의 3차원 층 지진격리시스템에 대한 지진동 저감성과 적용성을 평가하기 위해서 실험연구를 수행하였다. 3차원 층 지진격리시스템에 적용하기 위해서 마찰진자시스템과 에어 스프링을 설계하고 제작하였다. 제어 캐비닛과 액세스 플로어, 격자 프레임, 4개의 마찰진자와 에어 스프링으로 구성된 원전 주제어실 부분 실험모형을 2종류 제작하여 층지진격리시스템의 원전 적용성을 평가하였다. 실험을 위해서 원전 주제어실의 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE)의 수직방향, 수평방향 층응답 스펙트럼을 이용하여 인공지진 시간이력을 만들어서 진동대 실험에 사용하였다. 입력지진에 대한 실험모형의 지진응답은 비지진격리에 비해 3차원 층 지진격리시스템을 적용한 경우, 우수한 지진동 저감특성을 나타냈다.

주요어 마찰진자시스템, 에어 스프링, 층 지진격리, 진동대, 최대가속도, 최대상대변위, 응답스펙트럼

ABSTRACT >> An experimental study was performed to evaluate seismic reduction performance and applicability of 3-dimensional floor isolation system to the main control room of nuclear power plant. A friction pendulum system(FPS) and air spring were designed and fabricated for 3-dimensional floor isolation system. Two kind of the partial experimental model of a main control room attached to the FPS and air spring were tested on the shaking table. The experimental model consisted of a control panel, a 2.5m×2.5m access floor, four FPS and air springs. The artificial time histories based on the vertical and horizontal floor response spectrums(OBE, SSE) of the main control room were used as the earthquake input signals in the test. Compared to non-isolated system, the seismic response of experimental models using 3-dimensional floor isolation system were shown considerable seismic reduction performance.

Key words 3-Dimensional Floor Isolation, Friction Pendulum System, Air Spring, Shaking Table, Response Spectrum

1. 서론 및 연구동향

최근 국내에서는 원전설계지진의 최대값을 재평가하는 연구가 추진되고 있고, 평가결과에 따라서는 원전의 운전기준지진(OBE : Operating Basis Earthquake)과 안전정지지진(SSE : Safe Shutdown Earthquake)의 최대값이 현행설계기준에 비해 상향 조정될 가능성이 있다. 이와 같은 경우, 신규 원전 뿐만 아니라 기존 원전도 내진성능 보강방안을

별로 확보해야 할 필요성이 있다.

원전 주제어실은 핵심설비인 핵증기 공급계통(Nuclear Steam Supply System)의 전기, 계측기기를 제어하는 기능을 수행하고 있어 지진시 내진 안전성을 확보해야 하며, 기존 설계지진의 최대값이 상향 조정될 경우 우선적으로 내진성능을 보강해야 한다.

따라서, 원전 주제어실의 내진안전성을 확보하고, 내진성능을 보강하기 위해 층 지진격리(Floor Isolation) 시스템을 도입하여 주제어실의 지진응답을 저감시켜 주제어실내에 있는 전기/계측기기의 내진 안전성을 향상시키는 안이 검토되고 있다¹⁾.

층 지진격리시스템은 크게 2차원 층 지진격리시스템과 3차원 층 지진격리시스템으로 나누어진다. 2차원 층 지진격리시스템에 도입되는 장치로는 적층형 납-고무베어링(LRB:

¹⁾ 정회원·한전 전력연구원 책임연구원
(대표저자: leekj@kepri.re.kr)

²⁾ 한전 전력연구원 연구원

³⁾ 한전 전력연구원 책임연구원

⁴⁾ 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Laminated Rubber Bearing)과 마찰진자 베어링(FPS)이 일반적으로 사용되고 있다. 3차원 층 지진격리시스템은 2차원 층 지진격리시스템에 별도의 장치를 추가하여 수평방향과 수직방향 지진동을 동시에 저감시키는 시스템이다⁽²⁾.

제어실이나 컴퓨터실 바닥의 층 지진격리에 관련된 연구로는 미국에서 Lambrou와 Constantinou가 일반컴퓨터 주 제어실의 지진응답을 저감시키기 위해 실험연구를 수행한 사례가 있다⁽³⁾.

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

일본의 원자력안전기반기구(JNES)에서는 지진 시에 원전 컴퓨터시스템의 구조, 강도 및 기능의 건전성 평가와 내진여유도를 확인하기 위하여 층 지진격리시스템을 적용하여 진동대 실험연구를 수행하였다⁽⁴⁾.

국내에서는 김민규^(5,9,10) 등이 마찰진자베어링과 고무베어링을 이용하여 원전기기의 지진격리를 위한 진동대 실험연구를 수행하여 기기의 지진격리효과를 평가하였다. 진동수 특성이 다른 입력지진을 선정하여 원전격납건물과 유사한 진동수특성을 가진 시험체를 제작하여 마찰진자베어링과 고무베어링을 사용하여 지진격리기기의 지진동 저감특성을 진동대 실험을 수행하여 분석하였다.

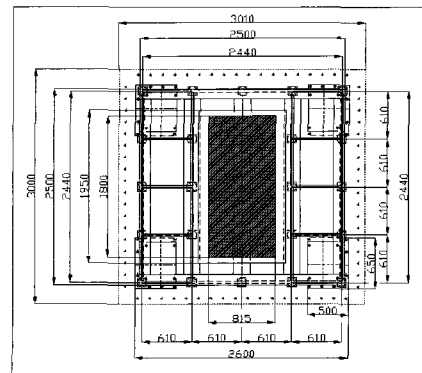
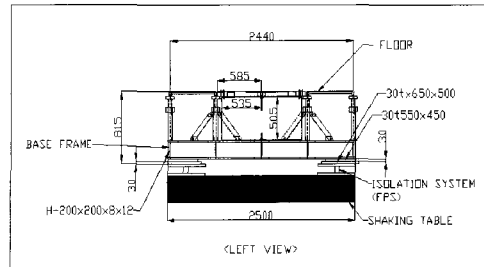
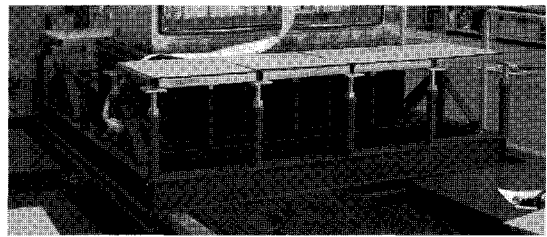
마찰진자베어링의 기계적 특성연구는 김영중⁽⁶⁾, 이경진⁽⁷⁾ 등이 수직방향하중을 재하한 상태에서 수평방향 진동수와 수평변위를 변화시켜 동적특성을 평가하였고, 김우범⁽⁸⁾ 등이 제어실에 마찰진자베어링을 적용하여 마찰계수에 따른 저감특성을 해석적으로 평가하였다.

본 연구에서는 원전 주제어실의 내진성능을 보장하는 방안을 개발하기 위해서 액세스 플로어에 층 지진격리시스템을 도입하여 수평방향과 수직방향 지진을 동시에 가진하여 지진저감성능을 실험적으로 평가하였다. 실험모형은 별도로 설계하여 원전 내진설계에 사용되는 운전기준지진(OBE), 안전정지지진(SSE)을 입력지진으로 하여 실험체의 3차원 지진저감효과를 평가하였다.

2. 진동대 실험

2.1 실험체 설계 및 제작

진동대 실험에 사용한 실험체는 원전 주제어실 액세스 플로어의 단위 유닛과 진동대의 크기를 고려하여 설계하였다.



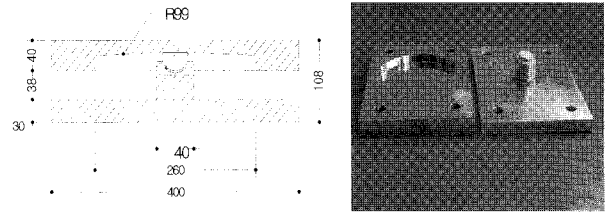
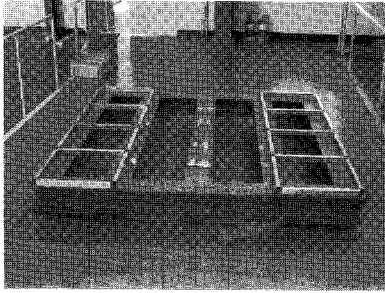
〈그림 1〉 원전주제어실 플로어 실험모형 Type I

설계하여 제작한 실험체는 두 가지로서 주제어실 액세스 플로어의 기존설계대로 제작한 실험모형 Type I과 기존 설계를 단순화시킨 실험모형 Type II이다. Type I의 크기는 $W \times D \times H = 2.5m \times 2.5m \times 0.8m$ 이고, H-200x200x8x12 부재를 바닥 프레임으로 사용하여 전체 무게는 2.0톤으로 제작하였다(고유진동수 11Hz, 그림 1 참조).

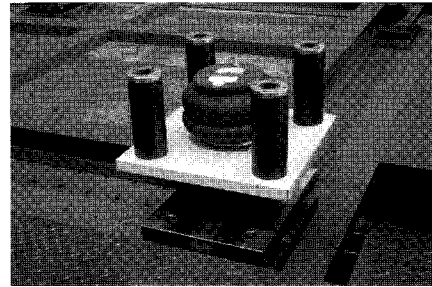
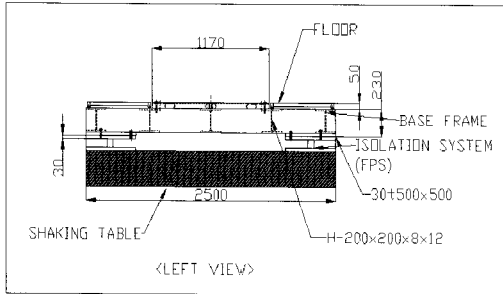
실험모형 Type II는 주제어실의 액세스 플로어에서 그림 1의 입면에 나타난 수직지지대를 제거하고 바닥프레임에 직접 상부기기를 고정시켜 설치하는 형식이다. 크기는 $W \times D \times H = 2.5m \times 2.5m \times 0.2m$ 이고 바닥 프레임은 Type I과 같은 부재를 사용하였으며 무게는 1.0톤이고, 그림 2에 전체 형태와 크기가 나타나 있다(고유진동수 10Hz). 실험모형 Type II는 Type I과 비교하여 고유진동수는 비슷하게 유지하면서 하부에 지진격리장치를 설치하였을 경우 Type I의 높이와 같게 하여 제어실의 설계변경없이 제어캐비닛의 케이블 설치가 가능하게 설계하였다.

2.2 제어 캐비닛의 특성

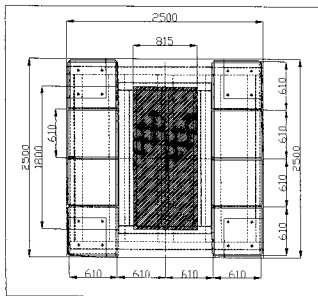
원전 주제어실 액세스 플로어의 실험모형 Type I, II에



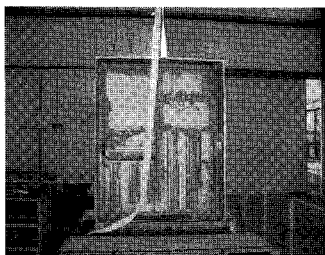
〈그림 4〉 마찰진자 시스템



〈그림 5〉 에어 스프링과 취부의 보호가이드



〈그림 2〉 원전주제어실 플로어 시험모형 Type II



〈그림 3〉 PCS 캐비닛

부착하여 지진동 응답평가를 하고자 하는 실험설비는 울진 원자력 1, 2호기의 주제어실에 설치되는 PCS 캐비닛이다 (그림 3 참조). 실제 실험 시에는 내부부속기기는 제거하고 본체만을 사용하여 평가를 수행하였고 본체만의 무게는 0.4 톤이다.

2.3 실험에 사용한 지진격리장치의 특성

진동대실험에 사용한 3차원 지진격리시스템은 원전 주제어실의 동적특성에 적합하게 설계하여 개발하였고, 구성은 마찰진자 시스템과 에어 스프링(Air Spring), 점성 댐퍼로

구성되었으며, 각 장치의 특성은 다음과 같다.

2.3.1 마찰진자 시스템

마찰진자 시스템은 층 지진격리시스템에서 수평방향 진동을 저감하고 제어하기 위하여 사용하였다. 마찰진자 시스템의 설계 고유진동수는 0.5Hz로서 그림 13~그림 14에 나타난 OBE와 SSE 수평방향 입력지진의 주진동수 대역인 2~6Hz를 피하기 위해 결정하였다. 마찰진자 시스템의 설계압축하중은 2 tonf/ea., 곡률반경은 0.99m이다. 곡면의 마찰재 성분은 순수 PTFE(Unfilled PTFE)이고, 마찰재 반경은 40mm, 지압면적은 12.566cm² 이고 그림 4는 제작한 마찰진자 베어링을 나타낸 것이다.

2.3.2 에어 스프링(Air Spring)

에어 스프링은 층 지진격리시스템에서 수직방향 진동을 저감시키기 위하여 사용하였다. 에어 스프링의 수직방향 설계 고유진동수는 2Hz 이고, 그림 13~그림 14에 나타난 OBE와 SSE 수직방향 입력지진의 주진동수 대역인 3~10Hz를 피하기 위해 결정하였다. 에어스프링의 수직하중용량은 실험모형의 중량을 고려하여 공기압 52 psi를 주입했을 때 기준으로 700kg/ea.이다.

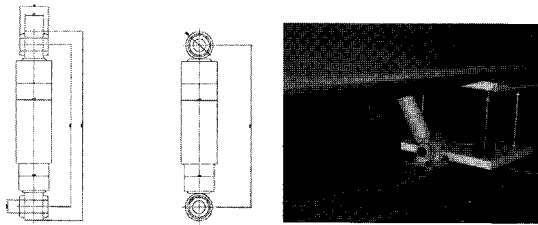
에어 스프링을 실험모형에 부착하고 수평방향 가진시 발생하는 Rocking 현상을 줄이기 위해 에어 스프링의 취부(Jig)에 4개의 보호 가이드를 설치하고 보호 가이드 내부벽면에 수직진동 시 마찰을 최소화하기 위해 소형 볼 베어링(Ball Bearing)을 설치하였다(그림 5. 참조).

2.3.3 점성 댐퍼(Viscous Damper)

3차원 층 지진격리시스템에서 크게 문제가 되는 점은 실험모형에 수평방향과 수직방향 지진동이 3축방향으로 동시에 가진될 때, 실험모형이 가진 방향과 수직방향으로 흔들리는 Rocking 현상이 발생하고, 이로 인해 과도한 변위가 발생하는 점이다. 이러한 변위를 제어하기 위하여 본 연구에서는 여러 가지 예비실험을 통해서 성능을 평가한 점성 댐퍼를 도입하여 수평/수직방향 동시가진에 의한 변위를 제어하였다. 댐퍼의 용량은 2 ton/ea.이고, 총 변위는 135mm, 감쇠계수는 15,000 N.sec/m, 감쇠비는 15%이다(그림 6 참조).

2.4 실험방법

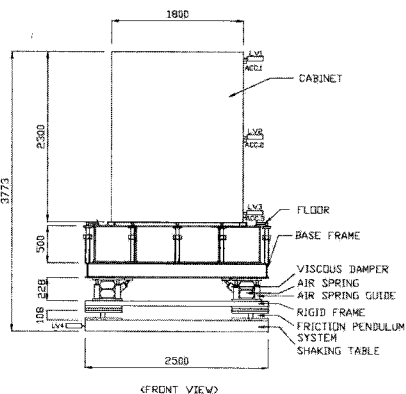
원전 주 제어실 액세스플로어의 3차원 층 지진격리시스템의 수평/수직방향 저감효과를 평가하기 위해서 실험체에 층 지진격리시스템을 설치하고 센서를 부착하였다(그림 7~8



〈그림 6〉 점성 댐퍼 도면과 설치 모습

〈표 1〉 진동대 실험순서

시험체 종류	지진격리 유무	입력지진	시험순서
Type I	지진격리	OBE	1
		SSE	2
	비지진격리	OBE	3
		SSE	4
Type II	지진격리	OBE	5
		SSE	6
	비지진격리	OBE	7
		SSE	8



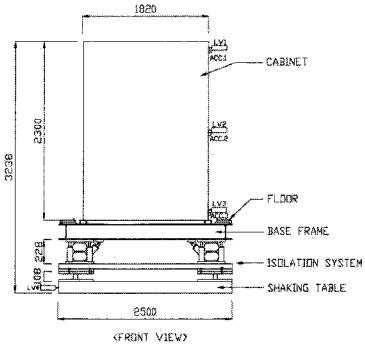
〈그림 7〉 센서 위치와 제어 캐비닛 설치개념도(Type I)

참조). 캐비닛의 수평방향 응답을 계측하기 위하여 가속도 센서를 캐비닛의 상단부, 중앙부, 하단부에 3개 설치하였으며, LVDT는 캐비닛 상단부, 중앙부, 하단부, 진동대 테이블에 4개를 설치하였다.

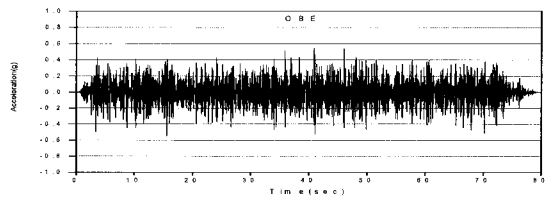
캐비닛의 수직방향 응답을 계측하기 위하여 가속도 센서를 캐비닛 하단부 좌우 2개, 수직방향 LVDT를 프레임에 1개 설치하였고, 3차원 층 지진격리장치는 플로어의 네 모서리에 모두 4개를 설치하여 지진격리장치를 설치하지 않은 경우와 비교하여 표 1에 나타난 순서로 실험을 수행하였다.

2.5 입력지진

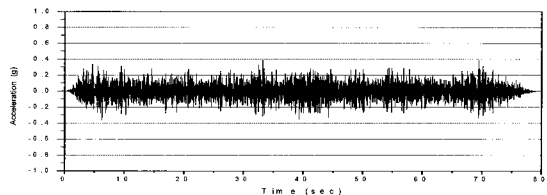
진동대 실험에 사용한 입력지진은 그림 9~그림 12에 나타난 바와 같이 원전 주 제어실이 위치한 EL.144'에서의 운전기준지진과 안전정지지진의 수평방향성분과 수직방향 시간-가속도 이력을 사용하였으며, 그림 13~그림 14는 원전 주 제어실 EL.144'에서의 수직방향과 수평방향의 층응답 스펙트럼을 나타낸 것이다. 두 지진을 입력지진으로 사용한 이유는 원전 주 제어실의 위치가 원전 보조건물 EL.144'에 위치해 있고, 이 위치에서의 층응답 스펙트럼을 입력지진으로 하



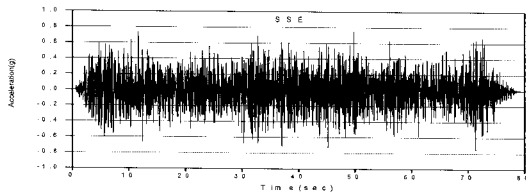
〈그림 8〉 센서 위치와 제어 캐비닛 설치 개념도(Type II)



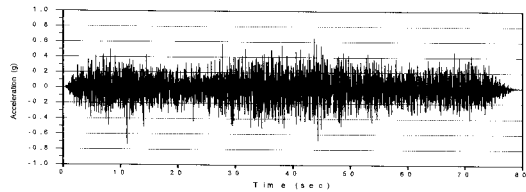
〈그림 9〉 운전기준지진(OBE)의 시간-가속도 이력(수평방향)



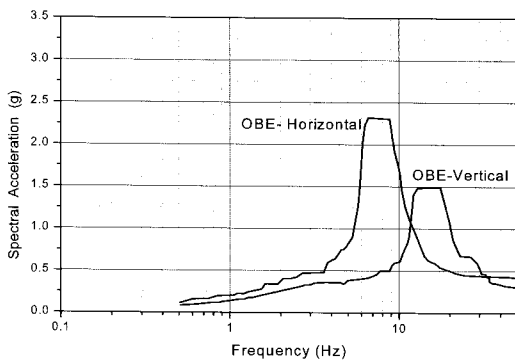
〈그림 10〉 운전기준지진(OBE)의 시간-가속도 이력(수직방향)



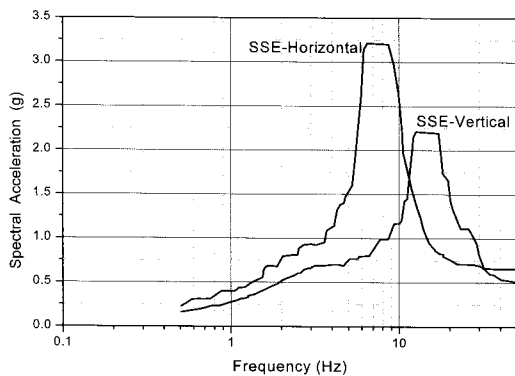
〈그림 11〉 안전정지지진(SSE)의 시간-가속도 이력 (수평방향)



〈그림 12〉 안전정지지진(SSE)의 시간-가속도 이력 (수직방향)



〈그림 13〉 국내 원전 운전기준지진(OBE)의 총응답 스펙트럼



〈그림 14〉 국내 원전 안전정지지진(SSE)의 총응답 스펙트럼

여 주 제어실과 제어기기의 내진설계를 수행하기 때문이다.

운전기준지진의 수평방향 성분은 침두진동수 대역이 7~9Hz이고, 수직방향 성분은 13~16Hz에 분포하여 지반(Ground Level)에서 계측되는 일반 지진동보다는 고진동수 특성을 가지고 있다. 안전정지지진은 침두진동수 대역이 운전기준 지진과 유사하지만 최대 스펙트럼 가속도가 40% 이상 큰 특성을 보이고 있다.

3. 실험 결과 및 분석

원전 설계지진인 운전기준지진과 안전정지지진을 수평방향과 수직방향으로 동시에 가진하였을 경우, 실험모형 Type I, Type II 각각에 대해서 최대응답가속도와 상대변위, 응답 스펙트럼 가속도의 특성은 다음과 같다.

3.1 제어 캐비닛의 높이별 최대응답가속도 분석

주 제어실 실험모형에 3차원 층 지진격리시스템을 설치하고, 수평/수직 3축방향으로 동시 가진했을 경우 실험모형별 주 제어실 캐비닛의 높이별 최대응답가속도는 다음과 같다.

3.1.1 실험모형 Type I

운전기준지진에 대한 실험모형의 수평방향 최대응답가속도는 비지진격리시 캐비닛 하단부에서 가장 작고(0.785g), 캐비닛 최상부에서 가장 크다(1.055g). 상단부에서 지진격리시의 응답(0.111g)이 비지진격리시의 응답(0.785g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 77% (1.055g→0.240g) 저감되었다. 안전정지지진에 대한 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 지진격리시의 응답(0.114g)이 비지진격리시의 응답(0.841g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 87% (1.887g→0.242g) 저감되었다(저감율 = 1 - (지진격리/비지진격리), 표 2 참조).

실험모형 Type I의 수직방향 응답가속도는 캐비닛 하단부의 좌측과 우측에서 실험자료를 계측하였다. 운전기준지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 지진격리시의 응답(0.211g)이 비지진격리의 응답(0.461g)에 비해 54% 저감되고, 우측에서는 64%(0.433g→0.157g) 저감되었다. 안전정지지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 지진격리시의 응답(0.326g)이 비지진격리시의 응답(0.768g)에 비해 56% 저감되고, 우측에서는 64%(0.721g→0.262g) 저감되었다(표 3 참조).

3.1.2 실험모형 Type II

운전기준지진에 대한 실험모형 Type II의 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 지진격리시의 응답(0.140g)이 비지진격리시의 응답(0.560g)에 비해 75% 저감되고, 최상부에서는 81%(0.977g→0.184g) 저감되었다. 안전정지지진에 대한 수평방향 최대응답가속도는 캐비닛 하단부에서 지진격리시의 응답(0.104g)이 비지진격리의 응답(0.732g)에 비해 86% 저감되고, 최상부에서는 91% (1.859g → 0.165g) 저감되었다(표 2 참조).

〈표 2〉 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 최대응답 가속도(수평방향)

지진파	최상부에서의 최대가속도(g)			중앙부에서의 최대가속도(g)			하단부에서의 최대가속도(g)			
	비지진격리	지진격리	저감율(%)	비지진격리	지진격리	저감율(%)	비지진격리	지진격리	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 3〉 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 최대응답 가속도(수직방향)

지진파	캐비닛 하단부 좌측에서의 최대가속도(g)			캐비닛 하단부 우측에서의 최대가속도(g)			
	비지진격리	지진격리	저감율(%)	비지진격리	지진격리	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

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

안전정지지진에 대한 수직방향 최대응답가속도는 좌측에서 지진격리시의 응답(0.303g)이 비지진격리 시의 응답(0.784g)에 비해 61% 저감되고, 우측에서는 66% (0.737g→0.249g) 저감되었다(표 3 참조).

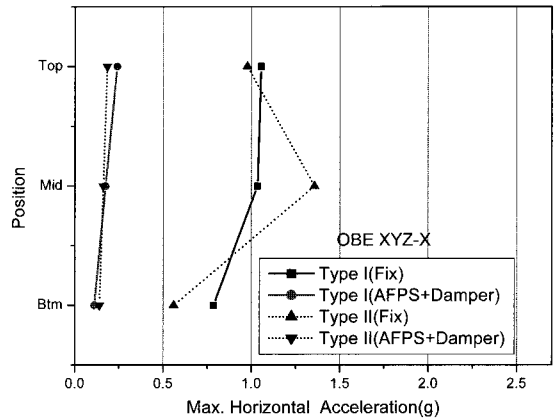
그림 15와 그림 16은 수평방향 운전기준지진과 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 최대응답가속도를 나타낸 것이다.

3차원 지진격리시스템을 설치한 경우 수평방향 응답은 입력지진의 크기에는 크게 영향을 받지 않고, 비슷한 크기로 저감되고 있고, 실험모형 Type I이 Type II 보다 약간 큰 응답을 나타내고 있다.

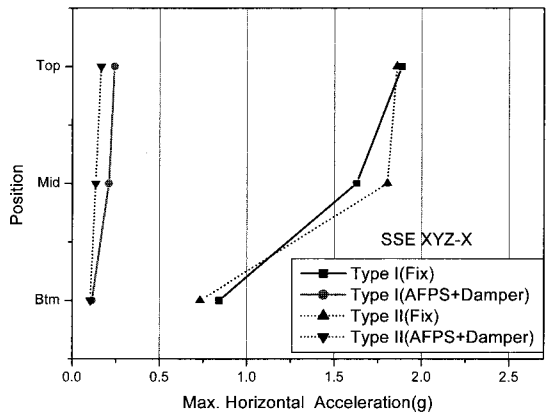
3.2 제어 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비 분석

그림 17은 수평방향 캐비닛의 높이별(상단부, 중앙부, 하단부) 최대가속도 응답비를 나타낸 것이고, 그림 18은 수직방향 캐비닛의 최대가속도 응답비를 나타낸 것이다. 각 지진별로 실험모형 Type I과 Type II의 지진격리, 비지진격리 시를 비교하여 최대가속도의 응답비(Response Ratio)를 나타냈고, 입력지진동의 최대가속도를 1로 하여 지진응답비를 나타냈다.

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



〈그림 15〉 캐비닛의 높이별 최대가속도(OBE : 수평방향)
(Btm : 캐비닛 하단부, Mid : 캐비닛 중앙부, Top : 캐비닛 상단부)



〈그림 16〉 캐비닛의 높이별 최대가속도(SSE : 수평방향)

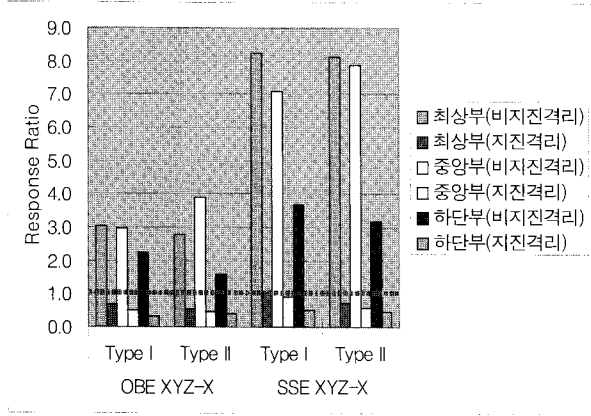
3.2.1 실험모형 Type I

실험모형 Type I의 수평방향 최대가속도 응답비는 상단부가 가장 크고, 하단부가 작게 나타나며 그 값은 운전기준지진의 경우 비지진격리시 2.3~3.1이고, 지진격리시 0.3~0.7을 나타낸다. 안전정지지진의 경우 비지진격리시 3.7~8.2, 지진격리시 0.5~1.0을 나타낸다.

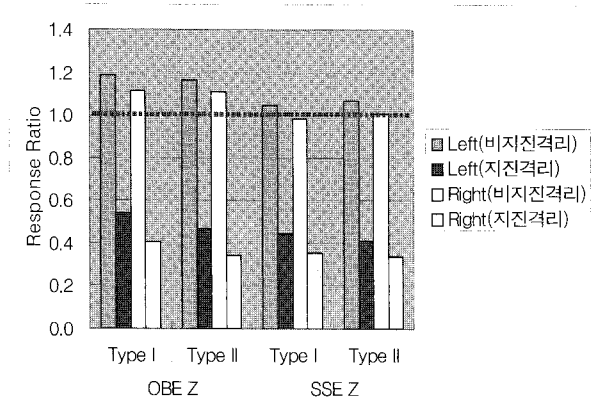
수직방향 최대가속도 응답비는 좌측과 우측이 약간 다른 응답을 보이고 있고, 좌측이 조금 큰 값을 나타내고 있다. 운전기준지진의 경우 최대가속도 응답비가 비지진격리시 좌측이 1.2, 우측이 1.1이고, 지진격리시 좌측이 0.5, 우측이 0.4이다. 안전정지지진의 경우 최대가속도 응답비가 비지진격리시 좌측이 1.1, 우측이 0.9이고, 지진격리시 좌측이 1.4, 우측이 1.15이다.

3.2.2 실험모형 Type II

실험모형 Type II의 수평방향 최대가속도 응답비는 경향이 실험모형 Type I과 비슷하다. 운전기준지진의 경우 비지



〈그림 17〉 캐비닛의 높이별 최대가속도 응답비(수평방향)



〈그림 18〉 캐비닛의 위치별 최대가속도 응답비(수직방향)

진격리시 1.5~3.9이고, 지진격리시 0.3~0.6을 나타낸다. 캐비닛 중앙부에서 최대값이 나타났는데 캐비닛의 국부지동이 나타난 것으로 판단된다. 안전정지지진의 경우 비지진격리시 3.1~8.1, 지진격리시 0.4~0.8을 나타낸다.

수직방향 최대가속도 응답비는 Type I과 비슷하게 좌측이 조금 큰 값을 나타내고 있다. 운전기준지진의 경우 최대가속도 응답비가 비지진격리시 좌측이 1.19, 우측이 1.11이고, 지진격리시 좌측이 0.54, 우측이 0.4이다. 안전정지지진의 경우 최대가속도 응답비가 비지진격리시 좌측이 1.05, 우측이 0.98이고, 지진격리시 좌측이 0.41, 우측이 0.34이다.

3.3 제어 캐비닛의 높이별 최대응답 상대변위

본 절에서는 운전기준지진과 안전정지지진을 수평방향과 수직방향으로 동시에 가진하였을 경우, 실험모형 Type I, Type II 각각에 대해서 캐비닛의 상단부, 중앙부, 하단부에서 지진격리시스템을 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대하여 최대응답 상대변위를 정리하여 분석하였다.

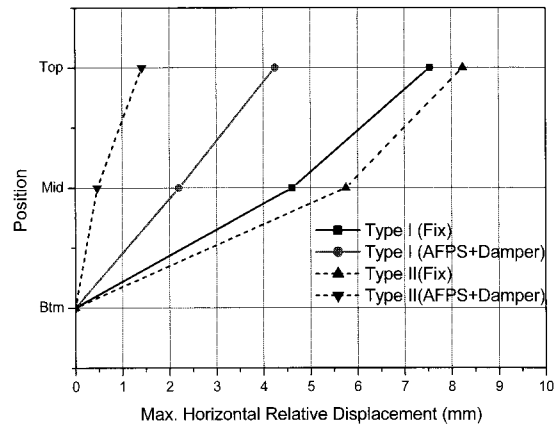
표 4는 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것이다. 수평방향 최대상대변위는 캐비

〈표 4〉 입력지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위(수평, 수직성분 지진 동시입력)

지진파	최상부의 하단부에 대한 최대상대변위 (mm)	중앙부의 하단부에 대한 최대상대변위 (mm)		하단부의 진동대 테이블에 대한 최대상대변위 (mm)			
		비지진격리	지진격리	비지진격리	지진격리		
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 5〉 입력지진에 대한 캐비닛의 수직방향 최대변위(수평, 수직성분 지진 동시입력)

지진파	하단부의 수직방향 최대변위(mm)		
	비지진격리	지진격리	
OBE	Type I	22.84	28.21
	Type II	22.6	31.92
SSE	Type I	37.27	46.9
	Type II	37.15	50.54

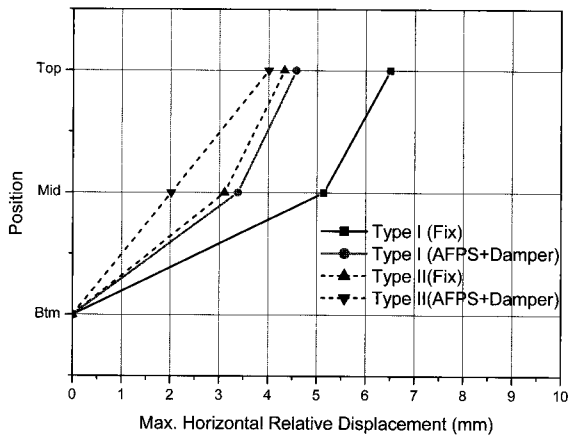


〈그림 19〉 운전기준지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위

닛의 하단부에 대한 상대변위를 나타낸 것으로서 캐비닛 중앙부와 상단부에서는 비지진격리시에 비해 지진격리시 변위가 상대적으로 줄어들지만 하단부에서는 지진격리장치의 특성상 상대변위가 증가하여 나타났다.

표 5는 캐비닛의 수직방향 최대변위를 나타낸 것으로서 비지진격리에 비해 지진격리시 수직방향 변위는 에어 스프링의 영향 때문에 비지진격리에 비해 변위가 크게 나타났다.

그림 19는 운전기준지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것으로서, 하단부의 변위에 대한 상대변위를 표현한 것이다. 상대변위는 실험모형 Type II에 층지진격리시스템을 설치했을 경우가 작게 나타났다.



〈그림 20〉 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위

그림 20은 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 수평방향 최대상대변위를 나타낸 것으로서, 상대변위가 실험모형 Type II에 층지진격리시스템을 설치했을 경우가 작게 나타났고, 실험모형 Type I에 층지진격리시스템을 설치한 경우에 상대변위는 크게 나타났다.

3.3.1 실험모형 Type I

입력지진이 운전기준지진(OBE)일 경우, 비지진격리시 캐비닛 상단부의 수평방향 최대상대변위는 7.54mm이고, 지진격리시 수평방향 최대상대변위는 4.25mm로서 지진격리시 수평방향 상대변위가 비지진격리시 상대변위에 비해 작게 나타났다(표 4 참조).

비지진격리시 캐비닛의 수직방향 최대변위는 22.84 mm 이고, 지진격리시 수직방향 최대변위는 28.21 mm를 나타내고 있어 지진격리시 변위가 더욱 커져서 나타나고 있다. 그 이유는 수직방향 면진장치인 에어 스프링의 영향 때문으로 수직방향으로는 지진격리시 변위가 비지진격리시에 비해 증폭되어 나타났다(표 5 참조).

입력지진이 안전정지지진(SSE)일 경우, 비지진격리시 캐비닛 상단부의 수평방향 최대상대변위는 6.5mm이고, 지진격리시 수평방향 최대상대변위는 4.57mm로서 지진격리시 수평방향 변위가 비지진격리시 변위에 비해 작다(표 4 참조).

비지진격리시 캐비닛의 수직방향 최대변위는 37.27 mm 이고, 지진격리시 수직방향 최대변위는 46.9 mm를 나타내고 있어 지진격리시 변위가 더욱 크게 나타났다(표 5 참조).

3.3.2 실험모형 Type II

입력지진이 운전기준지진(OBE)일 경우, 비지진격리시 캐비닛 상단부의 수평방향 최대상대변위는 8.24mm이고,

지진격리시 수평방향 최대상대변위는 1.42mm로서 지진격리시 수평방향 상대변위가 비지진격리시 상대변위에 비해 작게 나타나고, 실험모형 Type I에 비해서는 지진격리시 상대변위가 작게 나타났다(표 4 참조).

비지진격리시 캐비닛의 수직방향 최대변위는 22.6 mm 이고, 지진격리시 수직방향 최대변위는 31.92mm를 나타내고 있어 지진격리시 변위가 더욱 커져서 나타났다(표 5 참조).

입력지진이 안전정지지진(SSE)일 경우, 비지진격리시 캐비닛 상단부의 수평방향 최대상대변위는 4.33mm이고, 지진격리시 수평방향 최대상대변위는 4.01mm로서 지진격리시 수평방향 변위가 비지진격리시 변위에 비해 작고, 실험모형 Type I에 비해서 상대변위가 적게 나타났다(표 4 참조).

비지진격리시 캐비닛의 수직방향 최대변위는 37.15 mm 이고, 지진격리시 수직방향 최대변위는 50.54mm를 나타내고 있어 지진격리시 변위가 더욱 크게 나타났다(표 5 참조).

3.4 제어 캐비닛의 응답 스펙트럼 분석

안전정지지진을 입력지진으로 하여 실험모형 Type I, Type II에 대하여 캐비닛의 수평방향 응답스펙트럼과 수직방향 응답스펙트럼을 그림 21~그림 24에 나타내었다. 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 지진격리장치를 설치한 경우 저진동수 영역으로 이동하였고, 최대응답은 층 지진격리시스템을 설치한 경우 크게 저감되었다.

3.4.1 실험모형 Type I

그림 21은 입력지진을 안전정지지진으로 하여 캐비닛의 상단부에서 지진격리시 수평방향 응답스펙트럼과 비지진격리시 수평방향 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다.

캐비닛 상단부에서 비지진격리시의 응답은 크게 증폭된 응답을 나타내고 있다. 주 진동수는 7~8Hz 근처에 위치해 있고, 최대응답스펙트럼 가속도는 6.1g로, 입력지진에 비해 79% 증폭된 값을 보이고 있다.

지진격리시 응답은 주진동수 대역이 3Hz로 저진동수 대역으로 이동하고 최대응답스펙트럼 가속도는 1.1g로서 비지진격리시에 비해 81% 저감되었다. 3차원 지진격리시스템에서 수평방향 면진은 마찰진자 시스템이 주로 제어하게 설계되었고, 실제 응답에서도 지진격리시 응답이 진동수 대역 전체에 걸쳐서 분포하는 마찰진자 시스템 고유의 특성을 나타내고 있다.

캐비닛 하단부에서 측정된 수직방향 응답스펙트럼은 그림 22에 나타나 있다. 수직방향 응답스펙트럼은 캐비닛 하

단부의 좌측과 우측 2곳에서 측정한 값을 평균한 값으로서 비지진격리 시 최대응답스펙트럼 가속도가 3.0 g(진동수 10.8Hz), 지진격리시 1.26g(진동수 3.1Hz)로서 58% 저감되었다.

수직방향 지진격리는 에어 스프링이 제어하게 되어 있고, 실제 응답에서 특정 진동수(3.1Hz)에서 최대값이 나타나는 시스템 특성을 보이고 있다.

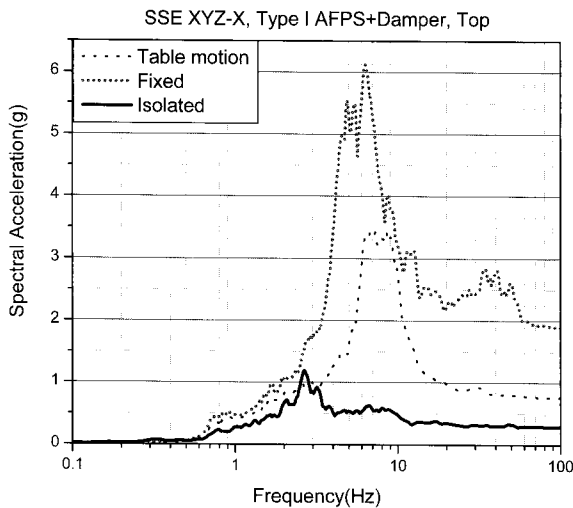
3.4.2 실험모형 Type II

그림 23은 실험모형 Type II에 대해서 입력지진을 안전정지지진으로 하여 지진격리시 응답스펙트럼과 비지진격리시 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다.

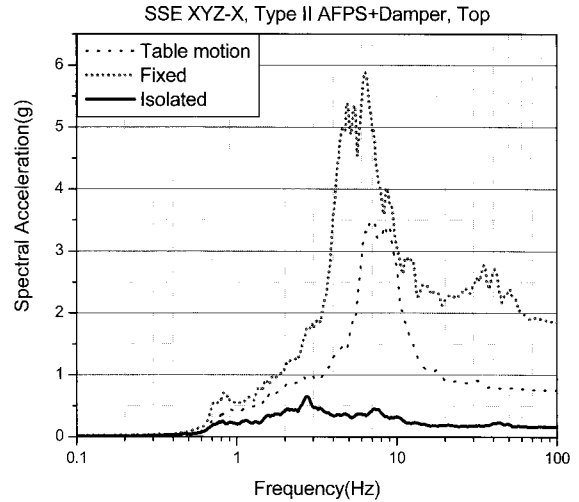
캐비닛 상단부에서의 비지진격리시의 응답은 주 진동수가 7~8Hz 근처에 위치해 있고, 최대응답 스펙트럼 가속도는 6.4g로 입력지진에 비해 크게 증폭되어 나타났다.

지진격리시 응답은 주진동수 대역이 2.8Hz로 이동하고 최대응답스펙트럼 가속도는 0.65g 로서 비지진격리시에 비해 89% 저감되었다. 실험모형 Type I에 비교해서 살펴보면, 실험모형 Type II가 캐비닛 상단부에서 비지진격리시 최대가속도는 4% 증가해서 나타나고, 지진격리시 최대가속도는 40% 작게 나타났다.

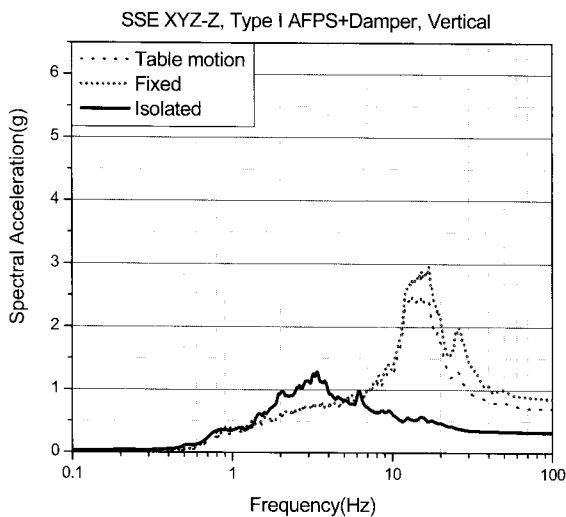
캐비닛 하단부에서의 수직방향 응답스펙트럼은 그림 24에 나타나 있다. 비지진격리시 최대응답스펙트럼 가속도가 2.8g(진동수 10.8Hz), 지진격리시 1.30g(진동수 3.3Hz)로



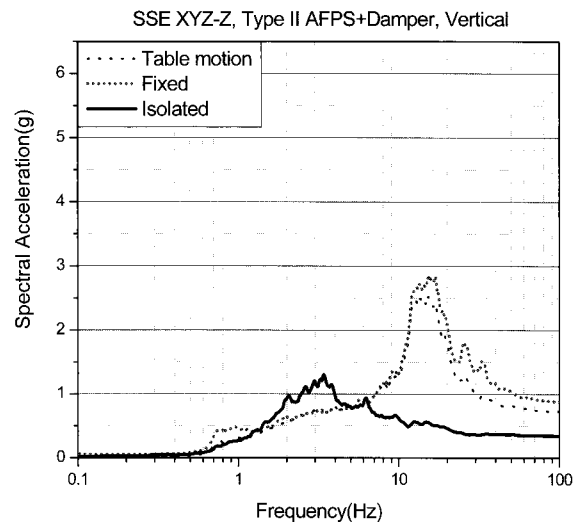
〈그림 21〉 실험모형 Type I의 안전정지지진 가진 시 수평방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 상단부)



〈그림 23〉 실험모형 Type II의 안전정지지진 가진 시 수평방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 상단부)



〈그림 22〉 실험모형 Type I의 안전정지지진 가진 시 수직방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)



〈그림 24〉 실험모형 Type II의 안전정지지진 가진 시 수직방향 응답스펙트럼 비교(캐비닛 하단부)

서 비지진격리에 비해 최대응답스펙트럼 가속도가 53% 저감되었다.

점성댐퍼를 추가하여 전체 시스템의 댐핑값은 설치 전에 비하여 증가하였고, 최대상대변위와 응답스펙트럼의 감소로 확인할 수 있다. 실험모형의 차이에 따른 댐핑값의 차이는 크지 않고 비슷한 경향을 나타냈다.

4. 결론

원전 주제어실 실험모형에 3차원 층 지진격리시스템을 적용하여 지진동 저감성능을 평가하기 위해 수행한 진동대 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 입력지진에 대한 실험모형 제어 캐비닛의 지진응답은 지진격리를 하지 않은 것에 비해 3차원 층 지진격리시스템을 적용한 경우, 우수한 지진동 저감특성을 나타냈다.
 - 최대응답가속도 : 안전정지지진이 입력지진일 경우 캐비닛의 높이별 수평방향 최대응답가속도는 지진격리를 하지 않은 경우에 비해 지진 격리를 한 경우가 86~91% 저감되었고, 수직 방향 최대응답가속도는 56~66% 저감되었다.
 - 최대응답 상대변위 : 수평방향 최대응답 상대 변위는 캐비닛 중앙부와 상단부에서는 지진격리를 하지 않은 것에 비해 지진격리를 한 경우가 변위가 상대적으로 줄어들지만 하단부에서는 지진격리장치의 특성상 상대변위가 증가하여 나타났다.
 - 응답스펙트럼 : 지진격리장치를 설치한 경우 지진격리를 하지 않은 경우에 비해 시스템의 진동수 대역이 저진동수 대역으로 이동하였고, 응답스펙트럼은 크게 저감되었다.
2. 주제어실 Access Floor의 높이를 조절한 실험모형의 지진응답은 설계를 변경한 실험모형 Type II가 주제어실 설계대로 제작한 실험모형 Type I에 비해 층 지진격리 시스템 적용에 따른 지진동 저감특성이 우수하게 나타났다. 그 이유는 실험모형 Type I에 비해 실험모형 Type II가 동적특성이 비슷한 상태에서 Access Floor의 높이가 상대적으로 작고, 이로 인해 전체적으로 지진응답이 작아졌기 때문으로 판단된다. 본 연구결과, 주제어실 Access Floor의 설계를 변경한 실험모형 Type II의 적용성이 평가되었으며, 세부설계가 보완되면, 원전 주제어실의 적용가능성은 충분하다고 판단된다. 가속도, 변위, 응답스펙트럼에 관한 실험결과를 정리하면 다음과 같다.
 - 최대응답 가속도 : 실험모형 Type II가 캐비닛의 위치

별로 10~30% 정도 가속도 응답이 작게 나타났다.

- 최대응답 상대변위 : 안전정지지진에 대한 캐비닛의 높이별 상대변위는 실험모형 Type II가 실험모형 Type I에 비해 10%정도 작게 나타났다.
- 응답스펙트럼 : 안전정지진에 대한 캐비닛 하단부에서의 최대응답스펙트럼 가속도가 실험 모형 Type II가 실험모형 TypeI에 비해 20% 정도 작게 나타났다.

감사의 글

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

참고 문헌

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. 9, pp. 61-74.
2. 이정진, “원전 주제어실 층면진 기술협의 공무 국의 출장보고서”, '04 전력연-단717, TC.03NK01.02004. 717 한국전력공사 전력연구원, 2004. 11.
3. V. Lambrou and M.C. Constantinou, “Study of Seismic Isolation Systems for Computer Floors”, Technical Report NCEER-94-0020, National Center for Earth-quake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, July, 1994.
4. 일본 원자력공학시험센터, “원자력발전시설 신뢰성 실증시험의 현황”, 1989.
5. 김민규, 전영선, 최인길, 서정문, “면진장치를 이용한 원전기기의 내진성능 분석”, KAERI/TR-2765/2004, 한국원자력연구소, 2004. 5.
6. 김영중, 허영철, 김병현, “마찰진자형 면진베어링의 특성연구”, 한국지진공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, 2000, pp. 407-414.
7. 이정진, 김갑순, 서용표, “FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가”, 한국지진공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 2003.
8. 김우범, 이정진, “마찰진자를 이용한 면진장치의 원전 주제어실 적용에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제17권 4호(통권 77호), 2005. 8, pp. 407-417.
9. 김민규, 전영선, “Coil Spring & Viscous Damper System의 동특성 분석”, 한국지진공학회 논문집, 제11권 2호(통권 54호), 2007. 4, pp. 19-26.
10. 김민규, 大鳥靖樹, 전영선, 최인길, “면진장치를 설치한 회전기기의 지진취약도 개선효과 분석”, 한국지진공학회 논문집, 제11권 6호(통권 58호), 2007. 4, pp. 69-78.