

기기면진을 위한 면진장치의 거동분석실험 (I) : FPS 거동분석

An Experimental Study of the Seismic Isolation Systems for Equipment Isolation : FPS

전영선* 김민규** 최인길** 김영중***
Choun, Young Sun Kim, Min Kyu Choi, In Kil Kim, Young Joong

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies on the equipment isolation effect in the nuclear containment. For this purpose, shaking table tests were performed. The isolation system, known as Friction Pendulum System (FPS), combines the concepts of sliding bearings and pendulum motion was selected. Peak ground acceleration, bidirectional motion, effect of vertical motion and frequency contents of selected earthquake motions were considered. Finally, it is presented that the FPS systems are effective for the small equipment isolation.

Key word : equipment isolation, nuclear containment, shaking table test, Friction Pendulum System (FPS)

1. 서 론

원전의 격납건물은 그 중요도나 안전요구도에 있어서 가장 중요한 위치를 차지하는 구조물이다. 불시에 발생할 수 있는 외부사건으로부터 경미한 손상을 입었을 경우라도 파급효과가 대단히 크기 때문이다. 따라서 원전구조물 특히 원전격납건물은 설계단계에서부터 세심한 주의가 요구되며 가동중에도 항상 그 안전성에 대한 검토와 확인이 필요한 구조물이다. 이러한 이유로 원전의 격납건물은 다른 모든 구조물에 비하여 최고의 안전허용치를 적용하여 내진설계를 수행하고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 격납건물 내부의 기기들이 지진시 손상을 입었을 경우 그에 의한 오작동으로 인하여 노심이 손상을 입고 결과적으로 격납건물에 치명적인 손상이 발생할 가능성은 배제할 수 없는 현실이다^{[1][2]}. 따라서 본 연구에서는 원전 격납건물 내부에 위치하는 기기의 면진을 통하여 내진성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 모형구조물을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 면진장치로는 1990년 이후 개발되어 최근 사용의 빈도가 늘어가고 있는 마찰진자형 베어링 (Friction Pendulum Bearing; FPS)을 이용하였다. FPS는 마찰재료와 곡면을 이용하여 지진력을 저감시키는 장치로서 상부하중의 크기에 관계없이 일정한 공진주파수를 유지하므로 본 실험

* 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임기술원, 공학박사, 정회원
** 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사, 정회원
*** 한국기계연구원 구조시스템연구부 선임연구원, 정회원

과 같은 소형기기를 대상으로 한 경우에는 면진장치로서 효과적인 것으로 판단되었다. 입력지진 파로는 탁월주파수대가 상이한 두가지 지진을 사용하였으며 결과적으로 구조물 내부에서의 위치 및 지진파에 따른 기기면진효과를 분석하였다.

2. 실험대상 구조물 및 모형

본 연구에서는 특별히 월성원전 2호기 격납건물을 목표로 설정하였다. 그것은 월성원전이 국내에서 최초로 도입된 중수로형 원전일 뿐만 아니라, 월성원전 인근에 발견된 단층의 활성단층 여부가 학계에 초미의 관심사로 대두되고 있는 실정이기 때문이다. 목표로 하는 격납건물의 형상은 다음의 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 격납건물은 원통형 shell 구조를 가지고 있으며, 직경은 43.6m 이고 돔구조를 제외한 부분의 높이는 48.14m 이다. 따라서 높이:폭의 비가 이와 유사한 실험모형을 만들기 위하여 다음 그림 2와 같은 3차원 프레임구조를 선택하였다. 실험대상으로 선택한 모형 구조는 4층으로 이루어진 철골구조로서 기둥의 부재는 강봉을 선택하였고 슬래브는 강판을 사용하도록 하였다. 격납건물의 경우 콘크리트 구조물이므로 강구조로 실험모형을 선정하는 것에 약간의 무리가 있을 수 있으나 모형제작의 편의성과 실험의 정확성 여부를 고려할 때 강구조를 선택하는 것이 적절할 것으로 판단되었다. 월성원전 격납건물에 대한 수치해석 결과를 검토해 본 결과 고유주파수가 4Hz 부근에서 발생하므로^[3] 그와 유사한 고유주파수를 갖도록 구조물의 제원은 다음의 표 1과 같이 하여 제작하였다. 또한 본 실험의 목적은 원전 격납건물내의 기기에 대한 면진효과를 분석하고자 하는 것이므로 기기를 모사하기 위하여 각각 중량 400kg의 강재를 구조물 4층에 면진시킨후 설치하여 기기를 대신하도록 하였다.

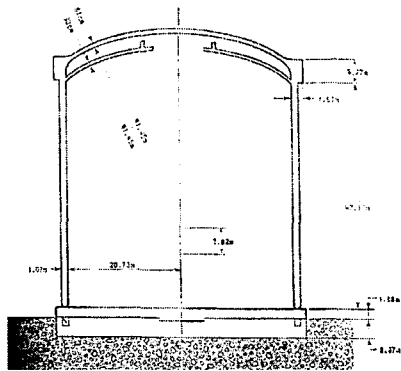


그림 1. 월성 2호기 격납건물의 모형 및 제원

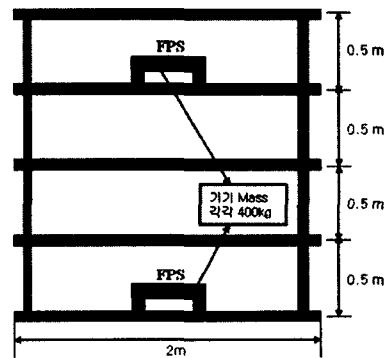


그림 2. 진동대 실험을 위한 모형

표 1. 실험 모형의 제원

항목	단위	제원
강관기둥	직경	4.27
	두께	0.36
슬래브	두께	4

3. 지진파의 선정

본 진동대 실험에서 사용한 입력지진파는 US NRC에서 제시한 Regulatory Guide 1.60^[4]의 표준 응답스펙트럼에 대해 생성한 인공시간이력(NRC)과 근거리 지진특성을 갖도록 생성한 인공지진파(SCE)를 사용하였다. 사용한 NRC 지진은 현재 국내의 원전설계시 사용하고 있는 표준설계응답스펙트럼을 사용한 인공지진파이다. 그러나 이러한 표준설계응답스펙트럼이 국내의 지반 및 지질 조건에 비하여 저진동수 부분은 보수적이고 고진동수 부분은 과소평가 되었다는 여러 연구결과들^{[5][6]}이 제시되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 특성들을 반영하여 고진동수의 영향을 부각시킨 인공지진시간이력을 생성하여 실험에 사용하였다. 각각의 지진은 0.1g, 0.2g, 그리고 0.25g의 3단계로 하여 사용하였으며 0.1g의 경우에 각각의 가속도 시간이력과 각 지진파의 가속도 응답스펙트럼은 다음의 그림 3에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 NRC의 경우는 2.5Hz, SCE지진의 경우는 25Hz대에서 탁월주파수 영역이 분포하여 있으므로 기기면진을 위한 진동대 실험을 수행하였을 경우 각 지진파에 따른 좋은 비교가 될 것으로 판단된다.

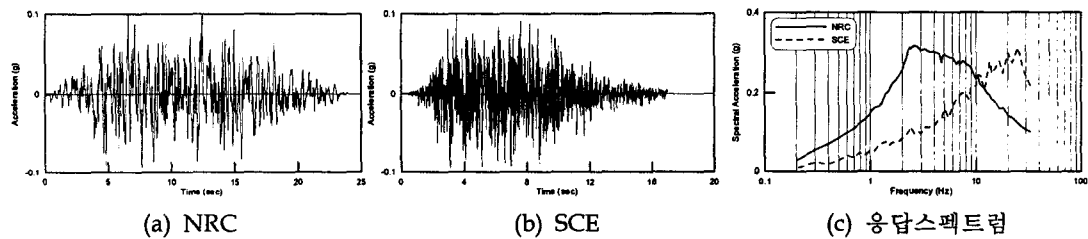


그림 3. 입력지진의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼

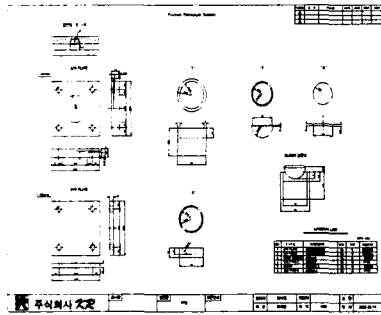
4. 면진장치의 선정 및 설계

본 실험에서는 소형기기의 면진효과를 분석하기 위하여 FPS를 사용하였다. FPS는 기존에 널리 사용하던 LRB와 같은 고무계열 면진장치에 비하여 내구성이 우수하고 상부하중에 상관없이 동일한 공진주파수를 구현할 수 있는 장점이 있으므로 최근에 각광을 받고 있는 면진장치이다. 해외의 경우는 FPS를 이용한 면진에 관한 많은 이론적 실험적 연구들이 진행되고 있고 실제로 구조물에 시공한 예도 많이 알려져 있다^{[7][8]}. 그러나 국내의 경우는 연구가 진행중이며 실제 구조물에 적용하여 실험을 수행한 예는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 선정된 구조물의 예비해석 결과를 이용하여 각 층에서의 층응답스펙트럼을 작성하고 그것을 반영하여 FPS의 고유주기를 1초로 결정하였다. 따라서 다음 식 (1)과 식 (2)에 의하여 FPS의 반경은 24.8cm로, 수평강성은 4.02 kgf/cm²로 결정하였다.

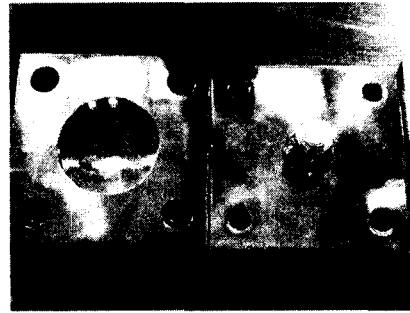
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

$$K = W/R \quad (2)$$

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 결정된 값으로 설계한 FPS의 제원과 제작된 형상은 다음의 그림 4와 같다.



(a) 제원



(b) 사진

그림 4. 실험에 사용한 FPS

5. 진동대 실험 및 결과분석

5.1 PGA에 따른 분석

실험결과를 정리하기 위하여 1차원 가진방향을 x 방향으로 정의하였으며, x 방향과 수평 직교방향을 y 방향, 그리고 연직방향을 z 방향으로 정의하였다. 결과적으로 18가지 경우의 실험을 수행하였으며 각 경우별 목표 PGA와 기기에서 측정된 가속도응답의 최대 PGA는 다음의 표 2에 정리하였다.

표 2. 진동대 실험결과 각 위치에서 측정된 PGA (단위 : g)

지진파	차원	Target PGA			Real PGA			4층 PGA			4층 FPS		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
SCE	1D	0.1	-	-	0.133	-	-	0.13	-	-	0.176	-	-
		0.2	-	-	0.322	-	-	0.352	-	-	0.164	-	-
		0.25	-	-	0.414	-	-	0.389	-	-	0.279	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.121	0.139	-	0.134	0.238	-	0.185	0.193	-
		0.2	0.2	-	0.326	0.302	-	0.373	0.372	-	0.181	0.167	-
		0.25	0.25	-	0.399	0.391	-	0.488	0.59	-	0.324	0.363	-
	3D	0.1	0.1	0.067	0.125	0.126	0.081	0.14	0.242	0.131	0.147	0.143	0.343
		0.2	0.2	0.134	0.311	0.305	0.215	0.413	0.543	0.339	0.288	0.27	0.922
		0.25	0.25	0.201	0.395	0.396	0.292	0.511	0.724	0.449	0.47	0.41	1.203
NRC	1D	0.1	-	-	0.132	-	-	0.21	-	-	0.139	-	-
		0.2	-	-	0.287	-	-	0.459	-	-	0.236	-	-
		0.25	-	-	0.331	-	-	0.663	-	-	0.398	-	-
	2D	0.1	0.1	-	0.127	0.203	-	0.227	0.39	-	0.162	0.18	-
		0.2	0.2	-	0.272	0.322	-	0.538	0.735	-	0.271	0.313	-
		0.25	0.25	-	0.323	0.378	-	0.653	0.863	-	0.402	0.432	-
	3D	0.1	0.1	0.1	0.134	0.187	0.122	0.229	0.381	0.141	0.18	0.176	0.185
		0.2	0.2	0.2	0.264	0.309	0.244	0.632	0.707	0.267	0.338	0.357	0.405
		0.25	0.25	0.25	0.314	0.376	0.312	0.683	0.791	0.322	0.381	0.436	0.511

표 2에서 보는 바와 같이 목표로 한 지진의 PGA와 실제 진동대에서 구현되는 PGA사이에는 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 진동대가 실제로 지진파를 모사하는 과정에서 발생한 것으로 따라서 분석은 실제의 PGA를 근거로 하여 수행하였다. 또한 면진된 기기가 설치된 곳은 구조물의 4층이므로 4층에서의 층응답을 예측하여 기기에서의 응답과 비교하였다. 4층의 층응답의 경우 SCE지진의 경우는 입력지진과 비교하여 큰 증폭이 발생하지 않은 반면 NRC 지진의 경우는 입력지진과 비교하여 약 2배 가량의 증폭이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 실험대상구조물의 공진주파수 영역이 4Hz 부근이므로 NRC지진의 탁월주파수대와 일치하기 때문이다. 다음으로 면진된 기기에서의 예측된 값을 보면 지진파에 따라 큰 값을 차이를 보이지 않는 것처럼 보이지만 층응답에 차이가 많으므로 면진효과는 상당히 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

이러한 영향을 정량적으로 비교해 보기 위하여 층 응답별 지진응답비율을 지진파와 목표 PGA 그리고 가진방법에 따라서 비교하여 다음의 그림 5와 그림 6에서 비교하였다. 그림 5에서는 수평 직교방향으로만 가진되었을 경우와 수직방향까지 3차원 가진을 수행하였을 경우에 1층 지진입력과의 지진응답비율을 도시하였다. 그림 6에서는 그림 5와 동일한 비교를 4층에서의 응답을 기준으로 재비교하여 도시하였다.

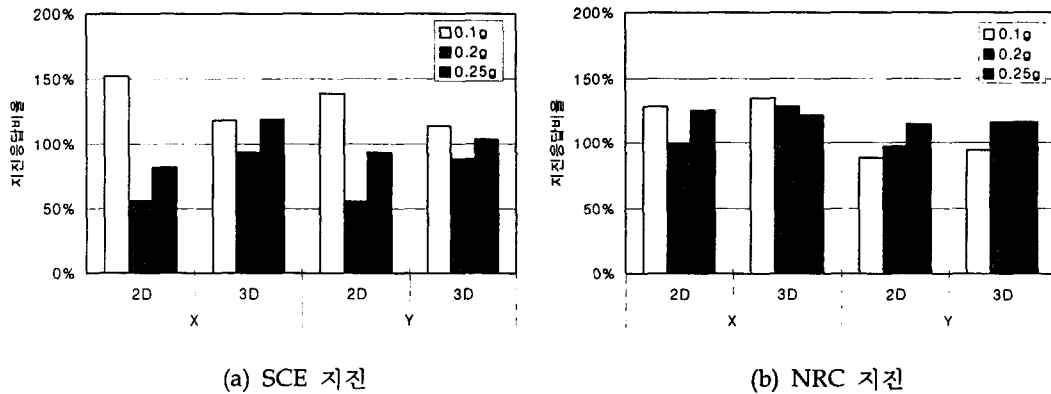


그림 5. 가진방법에 따른 x, y 방향의 지진력 저감률 (1층 응답기준)

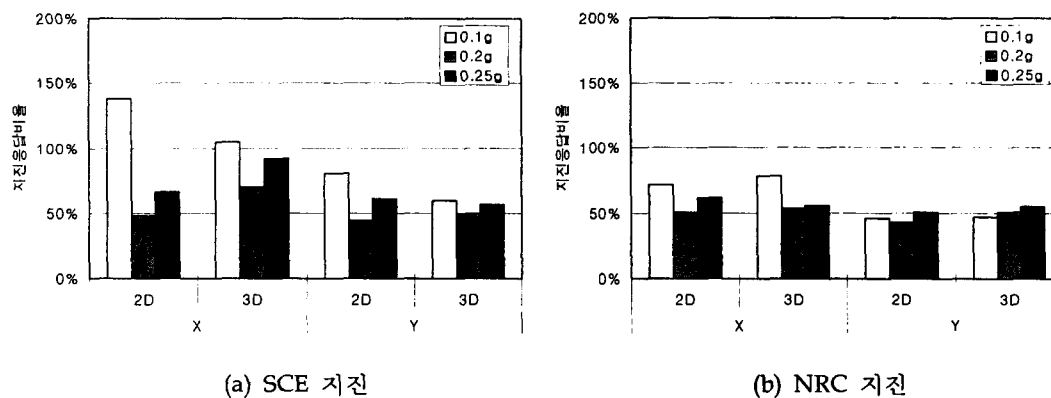
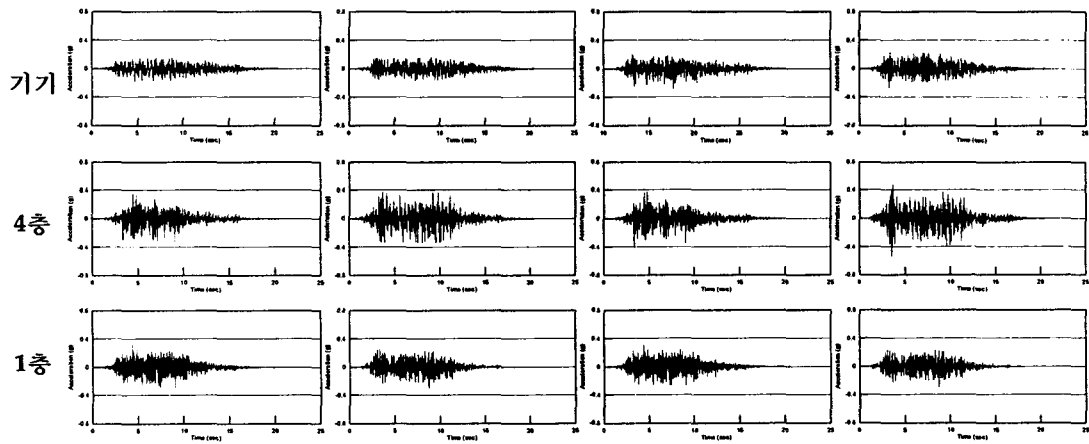


그림 6. 가진방법에 따른 x, y 방향의 지진력 저감률 (4층 응답기준)

그림 5에서 보는 바와 같이 1층의 응답기준으로 지진응답비율을 보면 지진별 가진 방향별로 지진응답에 큰 차이가 있는 것처럼 보이지만, 그림 6의 경우 4층의 실제 지진입력을 기준으로 비교하면 대부분의 경우에서 유사한 지진응답비율을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 SCE지진의 경우는 수평 직교방향인 2방향 가진인 경우에 비하여 수직성분이 고려된 3차원 가진의 경우 지진응답비율이 증가하면서 면진효과가 감소하는 반면 NRC 지진의 경우는 수직성분이 고려된 경우에도 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 지진파의 특성에 따라서 수직성분의 영향이 다르게 작용할 수 있음을 보여주는 것이다. 그림 6의 경우 지진력 저감율을 비교해보면 NRC지진의 경우는 지진응답비율이 50%정도로 나타났지만 SCE지진의 경우에는 지진응답비율이 그다지 높게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 1층응답을 기준으로 비교한 경우는 오히려 SCE지진시 면진효과가 더 좋게 평가되는 것을 알 수 있다. 따라서 기기면진의 경우 면진장치 설계시는 입력지진뿐 아니라 기기가 설치되는 구조물의 공진주파수 영역에 대한 포괄적인 검토가 이루어져야 함을 알 수 있다.

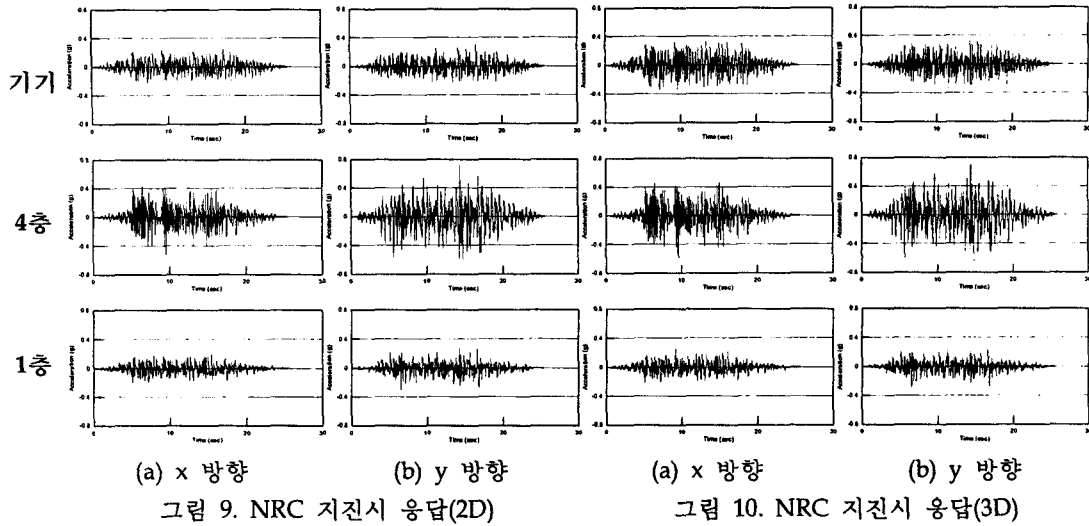
5.2 시간이력에 의한 분석

다음으로 각 지진시 1층, 4층 그리고 기기에서의 응답가속도 시간이력은 수평직교방향 모두에 대하여 다음의 그림 7, 8, 9 그리고 그림 10에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 경우 1층의 입력운동은 비교적 유사하게 모사가 되었음에도 불구하고 수평방향가진만 이루어진 경우와 수직방향의 가진도 동시에 이루어진 경우는 그 응답의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 9와 그림 10의 SCE지진의 경우에는 입력운동과 4층의 응답이 매우 유사함에도 불구하고 기기에서의 응답의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 경우는 3차원 가진의 경우가 증폭이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 수직방향 지진력에 의하여 FPS의 마찰력이 작게 작용하였음을 알 수 있다. 이러한 경향은 NRC 지진의 경우에도 동일하게 나타나는 것을 그림 9와 그림 10을 통하여 알 수 있다.



(a) x 방향 (b) y 방향
그림 7. SCE 지진시 응답(2D)

(a) x 방향 (b) y 방향
그림 8. SCE 지진시 응답(3D)



5.3 응답스펙트럼에 의한 분석

다음으로 동일한 경우에 대하여 각 응답의 응답스펙트럼을 다음의 그림 11과 12에 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 SCE 지진의 경우는 전술한 바와 같이 구조물에서의 응답이 적게 증폭되는 반면 면진효과가 비교적 잘 나타나는 반면 NRC 지진은 구조물에서의 증폭이 크게 발생되지만 면진효과는 적게 나타나는 현상이 발생하였다. 또한 2차원과 3차원을 비교해 볼 경우 전술한 것과 같은 결과를 좀 더 명확히 알 수 있다.

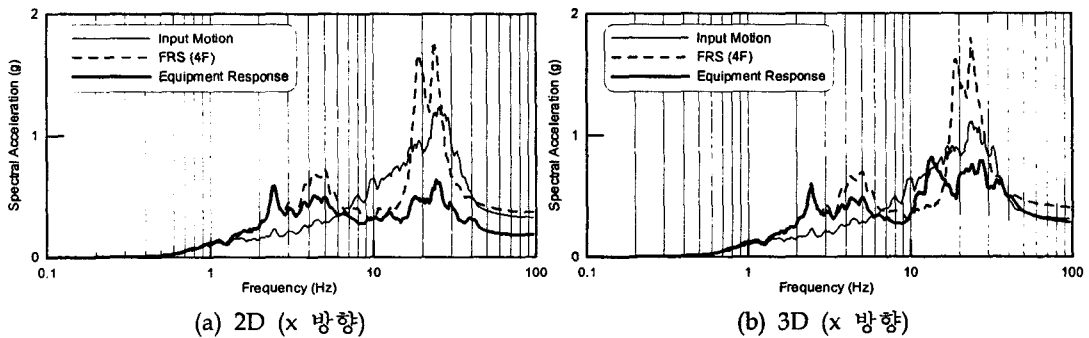


그림 13. SCE 지진시 응답에 대한 응답스펙트럼 비교 (목표 PGA=0.2g)

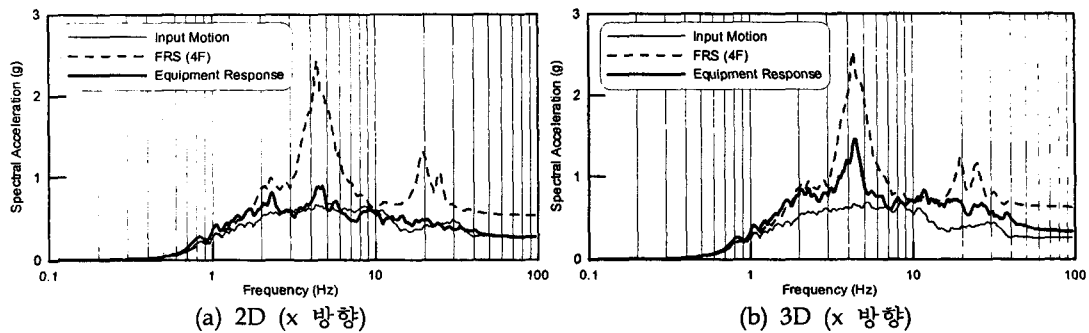


그림 14. NRC 지진시 응답에 대한 응답스펙트럼 비교 (목표 PGA=0.2g)

6. 결론

본 연구에서는 마찰형 지진격리 시스템(FPS)를 이용하여 원전격납건물 내부에 설치되는 소규모 기기의 면진효과를 분석하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 진동대 실험 결과 FPS를 사용한 기기면진은 저중량의 기기에 적용하여 어느정도의 면진효과를 확보할 수 있음을 알 수 있었다. 다만 발생가능한 지진파와 적용대상 구조물 및 위치를 고려한 면진장치의 설계가 필요한 것을 알 수 있었다.
2. FPS를 사용한 면진의 경우 지진파의 수직성분에 크게 영향을 받으므로 면진하고자 하는 위치에서 지진파의 수직성분과 구조물의 수직방향 고유진동수를 고려한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.
3. FPS의 면진효과에 대한 정확한 분석이 이루어지기 위해서는 FPS 곡면의 곡률반경과 마찰재료의 마찰계수등에 대한 세심한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구인 "구조물 건전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 진동대 실험을 수행한 한국기계연구원과 면진장치를 제작한 (주)케이알에 감사드립니다.

참고문헌

1. 전영선, 최인길, 원전기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가, 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.
2. 전영선, 최인길, 기기의 면진을 통한 원전의 내진안전성 향상. 한국지진공학회, 춘계학술발표회, 2003.
3. Wolsong 2 Nuclear Power Plant Design Report for Reactor Building Containment Structure Stress Analysis, Design Report 8602-21020-0002-00-DR-A, Canatom Inc., March 1994.
4. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
5. 한국원자력연구소, 지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구, KAERI/CR-65/99, 1999.
6. 한국수력원자력(주), 원전부지 지진안전성 정밀평가 기술개발 (중간보고서), 2002.
7. Zayas V., Low S., Bozzo L., and Mahin S., Feasibility and Performance Studies on Improving the Earthquake Resistance of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System, UCB/EERC-89/09, 1989.
8. Ersoy, S., Ala Saadeghvaziri, M., Liu, G.Y., and Mau, S.T., Analytical and Experimental Seismic Studies of Transformers Isolated with Friction Pendulum System and Design Aspects, Earthquake Spectra, 17(4), 569-595, 2001.