

원자력 전기기기 부품의 내진성능 확인을 위한 진동대 실험

Shaking Table Test to Verify the Seismic Performance of Nuclear Electric Components

장성진¹⁾ · 전법규¹⁾ · 박동욱¹⁾ · 김성원^{1)*}

Chang, Sung Jin¹⁾ · Jeon, Bub Gyu¹⁾ · Park, Dong Uk¹⁾ · Kim, Sung Wan^{1)*}

¹⁾부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

¹⁾Research Professor, Seismic Research and Test Center, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

Earthquakes of magnitude 3.0 or greater occur in Korea about 10 times on average yearly, and the number of earthquakes occurring in Korea is increasing. As many earthquakes have recently occurred, interest in the safety of nuclear power plants has increased. Nuclear power plants are equipped with many cabinet-type control facilities to regulate safety facilities, and function maintenance is required during an earthquake. The seismic performance of the cabinet is divided into structural and functional performances. Structural performance can be secured during the design procedure. Functional performance depends on the vibration performance of the component. Therefore, it is necessary to confirm the seismic performance of the components. Generally, seismic performance is confirmed through seismic simulation tests. When checking seismic performance through seismic simulation tests, it is difficult to determine the effect of frequency and maximum acceleration on an element. In this paper, shaking table tests were performed using various frequencies and various maximum accelerations. The seismic performance characteristics of the functions of electrical equipment components were confirmed through tests.

Key words: Nuclear electric component, Shaking table test, Frequency, Peak acceleration

1. 서론

대한민국에 발생하는 지진은 기상청 통계에 따르면 연평균 약 46회 (1978년~2022년) 발생하고 있으며, 리히터 규모 3.0 이상의 지진은 연평균 약 10회 발생하고 있다. 또한 대한민국에 발생하는 지진의 횡수가 점점 증가하는 추세에 있다. 한국수력원자력의 본사와 원자력발전소 6호기가 위치하고 있는 경주에서 2016년에 리히터 규모 5.8의 경주지진이 발생하였고, 인근 지역인 포항에서 2017년에 리히터 규모 5.4의 포항지진이 발생하였다.

대한민국에 설치된 원자력 발전소의 인근지역인 경주와 포항에서 지진이 발생함에 따라 원자력 발전소의 안전성에 대한 관심이 높아졌다. 원자력 발전소에는 안전 설비들을 제어하기 위한 다양한 종류의 전기기기들이 설

치되고 있으며, 제어설비들은 대부분 캐비닛 형태로 구성되어 있다. 캐비닛 형태의 제어설비들은 원자력 발전소의 안전을 위하여 지진과 같은 사고 발생 시 기능 유지가 요구되고 있다.

캐비닛 형태 전기기기의 지진에 대한 내진성능을 확인하기 위하여 구조 해석과 내진성능실험을 진행하고 있다. 전기기기의 내진성능실험은 발전소의 설치조건을 고려하여 전기기기를 진동대에 설치하고, 발전소에 전기기기가 설치되는 위치의 층응답스펙트럼을 이용하여 실험을 수행하여 전기기기의 내진성능을 확인하는 실험이다. 캐비닛 형태의 전기기기의 성능을 검증하는 다양한 연구가 진행되고 있으며, 캐비닛 형태의 전기기기의 한계상태를 확인하는 연구도 진행되 나 있다[1, 2].

전기기기의 내진성능실험에서는 구조와 기능에 대한 성능을 확인하게 된다. 구조적 손상은 캐비닛 강성을 높이거나 면진장치를 활용하여 손상을 방지할 수 있다. 따라서 구조적 내진성능은 기기의 설계 단계에서 확보가 가능하다. 기능적 성능은 부품의 진동에 대한 성능에 좌우된다. 부품의 내진성능을 향상시켜 캐비닛의 내진성능을 향상시키는 방법과 캐비닛의 구조

*Corresponding author: Kim, Sung Wan

E-mail: swkim09@pusan.ac.kr

(Received November 23, 2023; Revised February 23, 2024; Accepted February 26, 2024)

적 성능 향상을 통한 부품에 작용하는 하중을 저감시켜 기능이상을 방지하는 방법이 있다. 따라서 캐비닛의 구조적 성능 향상으로 기능이상을 방지하는 방법이 이상적이다. 이와 같은 이유로 캐비닛의 보강에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 수치해석 방법을 통하여 원자력 발전소 캐비닛에 보강프레임, 감쇠기 설치, 동조질량감쇠기 등을 보강하는 연구가 진행된 바 있으며 [3, 4], 발전소에 설치되는 배터리 차저의 구조적인 내진 보강을 수행하여 내진성능을 향상시키는 연구가 진행되었다[2].

부품의 내진성능 정보를 이용한다면 안전한 전기기기의 내진설계가 가능하다. 부품의 정확한 내진성능을 확인하기 위하여 부품에 작용하는 하중이 필요하다. 전기기기에 설치된 부품들은 발전소 건물의 특성과 캐비닛의 특성이 모두 고려된 캐비닛 내부의 응답스펙트럼(ICRS, In-cabinet response spectrum)의 영향을 받는다. 원자력발전소에 설치되는 캐비닛의 ICRS를 안다면 부품의 내진성능을 확인하는 데 도움이 되나 ICRS의 확인이 어려운 경우가 많다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 EPRI에서 발행한 보고에 다양한 크기의 캐비닛 실험을 통하여 ICRS를 예측하는 방법을 제시[5]하고 있으며, 이를 보완하는 연구가 수행되었다[6]. 또한 이외에도 Ritz백터를 이용하는 방법도 제시되었다[7].

설계가 완료되어 상용화된 부품을 조합하여 전기기기를 설계한다. 따라서 내진성능이 확보된 부품을 활용하고, 전기기기가 발전소에 설치되는 위치와 캐비닛의 형상 등을 고려하여 ICRS를 수치해석으로 도출하면 효율적으로 내진성능이 확보된 전기기기의 설계가 가능할 것이다.

지진모사실험을 통하여 부품의 내진실험을 수행하는 방법[8, 9]이 있으나 지진모사실험으로 부품의 내진성능을 확인할 경우 진동수가 부품에 미치는 영향을 고려하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다양한 진동수와 다양한 최대가속도에 대한 내진실험을 수행하여, 전기기기의 설계에 활용할 수 있는 정보를 제공하였다.

2. 부품 선정

원자력발전소에는 발전소를 운용하기 위한 다양한 기기들이 설치되어 있으며, 안전관련 기기는 사고 조건에서 기능 유지가 요구된다. 원자력 발

전소에 설치되는 기기들은 비상 디젤발전기, 스위치기어, 로드 센터, 모터 제어센터, 배터리 충전기 등이다. 비상 디젤발전기와 같은 발전기도 있으나 대부분 캐비닛형 기기들이 사용되고 있다. 캐비닛형 기기들의 내부에는 relay와 MCCB(Molded Case Circuit Breaker) 등의 다양한 부품들이 설치되고 있다. 본 논문에서는 캐비닛형 기기에 많이 설치되고 있는 relay와 MCCB의 내진성능을 확인하였다.

Table 1과 같이 전기기기 부품의 고장으로 안전상의 문제가 발생할 우려가 있는 부품들을 실험체로 선정하였다. 과부하 또는 과전류 등으로부터 전기 회로를 보호하는 MCCB를 용량에 따라 4종을 실험체로 선정하였다. 허용된 이상의 부하가 걸려서 과전류가 흐르게 될 때 주회로를 차단하여 회로를 보호하는 over current relay와 전압이 설정값 이하로 저하하면 동작하는 under voltage relay를 실험체로 선정하였다. 또한 원격제어를 위한 contactor와 스위치 기능을 하는 control relay에 대한 내진성능 실험을 수행하였다.

MCCB는 과부하에 의해 trip이 발생하도록 설계된 부품이다. 따라서 과부하가 발생하지 않도록 MCCB를 설치하여 정상작동이 아닌 진동에 의한 trip 발생 여부를 확인할 수 있도록 실험을 설계하였다. Relay의 chattering은 접점이 떨어지는 현상으로 회로 오작동의 원인이 될 수 있다. 따라서 지진하중과 같은 진동으로 인하여 chattering이 발생하여 전기기기에 기능이상을 유발할 수 있다. 본 논문에서는 부품의 기능이상을 MCCB는 trip으로, relay는 chattering으로 설정하였으며, 동동확인을 통하여 기능이상을 내진실험 중에 확인하였다.

3. 실험 방법

3.1 실험체 설치

전기기기 부품의 진동대 설치를 위하여 지그를 사용하였으며, 입력하중의 왜곡을 최소화하기 위하여 고유진동수가 40 Hz 이상이 되도록 지그를 제작하였다. 실험을 위해 선정된 전기기기 부품을 전기기기에 설치하는 조건과 동일한 방법으로 지그에 설치하였다.

Table 1. Specification of the specimen

Test specimen No.	Name	Model Name	Dimensions, (mm)			Weight (kg)	Manufacturer
			Length	Width	Height		
TS-1	Ground over current relay	DGF-P11-1E	104.8	57	97	0.6	DEESYS
TS-2	MCCB	TS250HU(Q) 63A	160	105	178	2	LSELECTRIC
TS-3	Under voltage relay	DUV-M20D-1E	210	139	202	2	DEESYS
TS-4	control relay	YSMR05-3P 120A	82	42	51	0.075	YONGSUNGELEC
TS-5	control relay	YSMR05-3P 024D	82	42	51	0.075	
TS-6	MCCB	TS250HU(Q) 3.2A	160	105	178	2	LSELECTRIC
TS-7	Over current relay	MT-150(Q)	117	85	140	0.7	
TS-8	Contactor	MC-130a(Q) + UA-4(Q)	158	95	158	2.4	
TS-9	Over current relay	MT-32(Q)	95	45	93	0.16	
TS-10	MCCB	TD125HU(Q) 80A	160	90	163	1.5	
TS-11	Contactor	MC-32a(Q) + UA-4(Q)	121	45	83	0.5	
TS-12	MCCB	TD125HU(Q) 15A	160	90	163	1.5	

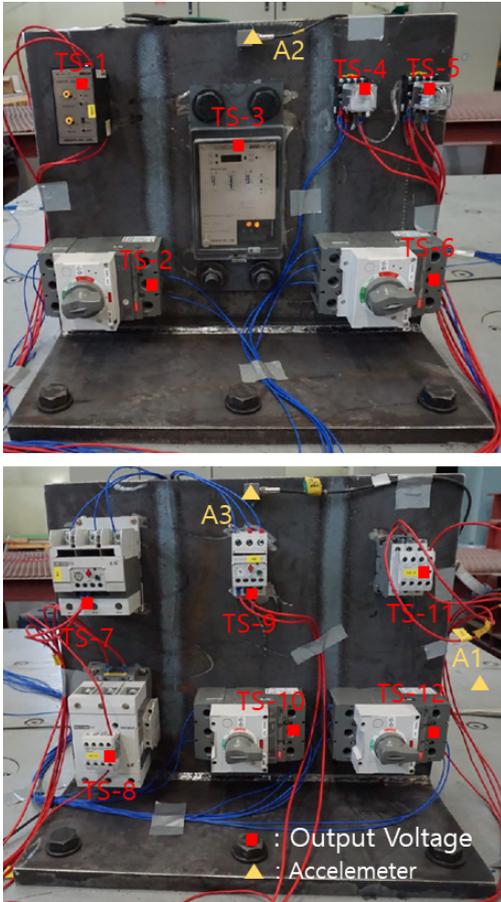


Fig. 1. Sensor location

Fig. 1과 같이 지그2개에 각각6종의 전기기기 부품을 설치하였으며, 지그는 진동대에 M24 볼트 6개를 이용하여 고정하였다. 진동대와 지그에 가속도 센서를 설치하여 가속도응답을 계측하였다. 진동대에 설치된 가속도 센서는 A1, TS-1부터 TS-6의 부품이 설치된 지그의 상부에 설치된 가속도 센서는 A2이다. 그리고 부품 TS-7부터 TS-12가 설치된 지그의 상부에 가속도 센서 A3을 설치하였다. 진동실험을 수행하는 동안 전기기기 부품의 기능 유지 여부를 확인하기 위하여 진동실험을 수행하는 동안 부품을 작동하였다. MCCB는 전력이 유지되는지와 Trip 여부를 확인하였다. 또한 Relay와 contactor는 IEEE C37.98[10]에 따라 2 ms 이상의 chattering 발생 여부를 확인하기 위하여 1초에 9,600개의 데이터를 수집하였다.

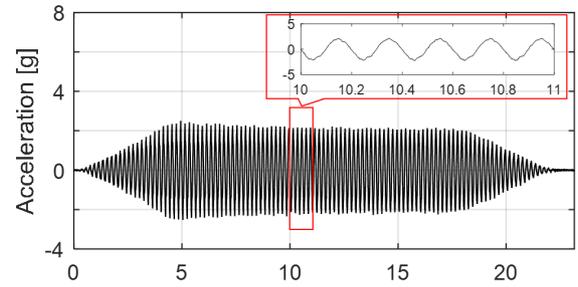
3.2 입력하중

일반적으로 진동대를 이용한 지진모사실험을 수행하여 내진성능평가를 수행한다. 그러나 지진모사실험에 사용되는 지진파는 다양한 진동수를 포함하고 있으므로 진동수에 따른 실험체의 내진성능을 확인하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 전기기기 부품의 내진성능을 확인하기 위해서 주기하중(sine wave)을 이용하였다. 주기하중의 진동수와 최대가속도(진폭)의 크기를 변경하면서 내진성능실험을 수행하여, 진동수와 최대가속도에 대한 전기기기 부품의 내진성능 특성을 확인하였다.

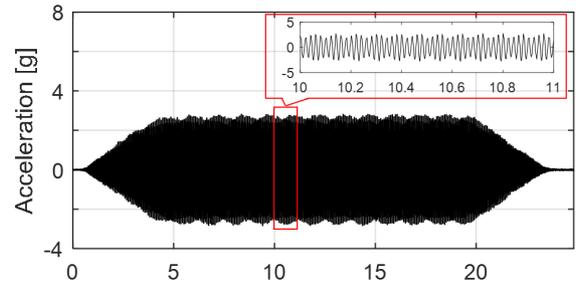
전기기기 부품의 내진성능 확인을 위한 입력하중의 크기를 다양하게 적

용하여 내진성능을 확인하였다. 진동수와 최대가속도의 간격을 다양하게 수행하고 효율적인 실험을 위하여 2단계로 나누어 실험을 진행하였다. 1단계 실험에서 입력하중의 진동수는 5 Hz부터 50 Hz까지 1/3 octave 간격으로 하였으며, 입력하중의 최대가속도를 2 g부터 6 g까지 2 g 간격으로 하였다. 2단계 실험은 1단계 실험 수행 중 기능이상이 발생하면 기능이상이 발생하지 않았던 실험의 주기와 가속도를 고려하여 진동수와 최대가속도의 중간 크기 실험을 수행하였다. 2단계 실험의 진동수는 5 Hz부터 50 Hz까지 1/12 octave 간격으로 하였으며, 가속도는 0.5 g 간격으로 실험을 수행하였다.

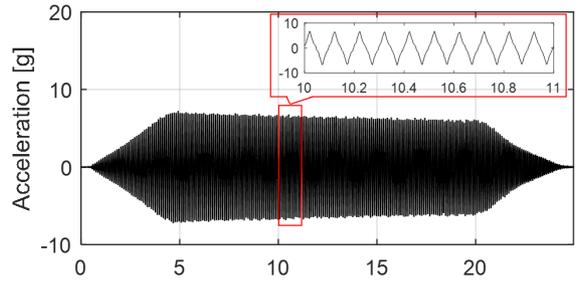
축 방향별 단축으로 실험을 수행하고, 가진 지속시간은 15초로 하였다.



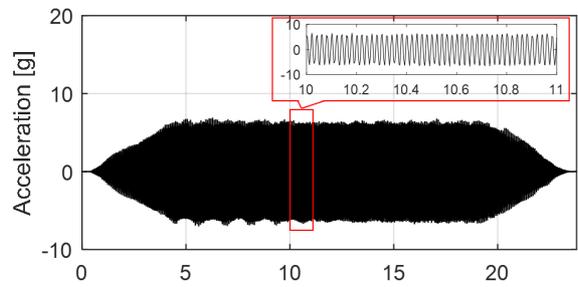
(a) 5 Hz, 2 g



(b) 50 Hz, 2 g



(c) 10 Hz, 6 g



(d) 50 Hz, 6 g

Fig. 2. Acceleration time histories (A1)

Table 2. Sine wave test

Step	Acc. (g)	Dir.	Frequency (Hz)	
1	2	X	5, 6.3, 7.9, 10, 12.6, 15.9, 20, 25.2, 31.7, 40, 50	
		Y		
		Z		
	4	X		
		Y		
		Z		
	6	X		10, 20, 40, 50
		Y		10, 20, 25.2, 28.3, 31.7, 40, 44.9, 50
		Z		10, 20, 31.7, 33.6, 35.6, 40, 44.9, 50
2	1~6	X	10~50	
		Y		
		Z		

고진동수와 가속도가 높은 실험에서 전기기기 부품의 손상이 우려되어 저진동수와 최대가속도가 낮은 실험부터 순차적으로 실험을 진행하였다. 입력하중의 크기는 Table 2와 같으며, Fig. 2는 최대가속도(6g)와 최소가속도(2g) 그리고 저주파수(5 Hz, 10 Hz)와 고주파수(50 Hz)를 포함하는 입력하중 가속도 그래프이다.

본 실험은 원자력 성능시험 인증기관인 지진방재연구센터(SESTEC)에서 6자유도 진동대를 이용하여 수행하였다. 최대가속도 6g까지 실험을 수행해야 하므로 최대중량(60 kN) 적재 시 최대가속도 ±7g, 최대속도 ±2 m/s, 수평방향 최대변위 ±250 mm, 그리고 수직방향 최대변위 ±150 mm 인 장비를 이용하였다.

4. 실험 결과

4.1 공진탐색실험

지그의 공진주파수를 확인하기 위하여 실험 전 공진탐색실험을 수행하였다. 공진주파수를 확인하기 위하여 전달함수를 활용하였다. 전달함수 (T_{xy})는 진동대에서 입력된 가속도(x)에 대한 지그에서 계측된 가속도(y)의 비로 도출하였다.

$$T_{xy}(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \tag{1}$$

여기서, P_{yx} 는 입력 가속도와 지그에서 계측된 가속도의 cross power spectral density 이고, P_{xx} 는 입력 가속도의 power spectral density이다. 공진탐색실험 결과의 정확성을 높이기 위하여 각각의 가속도 신호에 symmetric hamming window를 적용하였다.

전달함수 산정결과를 Table 3에 나타내었다. 지그의 공진탐색실험 결과 X방향과 Z방향은 50 Hz 이하에 공진주파수가 없는 것으로 확인되었으며, Y축 방향은 40 Hz 인근에 공진주파수가 있는 것으로 확인되었다. 지그의 Y축 방향의 공진주파수가 40 Hz를 넘으므로 40 Hz 실험에서 지그에서 증폭된 주기하중이 작용할 것으로 판단되므로 전기기기 부품에 작용한 가속

Table 3. Resonant frequency of component

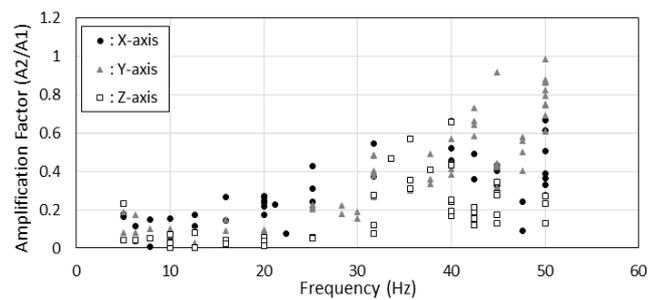
Test name	Direction	Resonant frequency (Hz)	
		A2	A3
Before sine wave test	X	-	-
	Y	42.25	41.75
	Z	-	-
After sine wave test	X	-	-
	Y	43.00	43.50
	Z	-	-

도를 입력하중이 아닌 지그에 부착한 가속도센서의 가속도응답을 부품에 작용한 입력하중으로 활용하였다. 실험 전과 실험 후의 지그 공진주파수의 큰 변화가 없는 것으로 확인되므로 일관성 있는 실험이 수행된 것으로 판단된다.

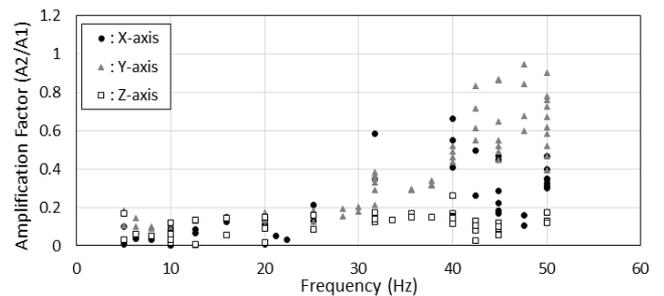
4.2 주기하중실험 결과

주기하중실험에서 계측한 가속도의 증폭비를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3은 진동수별 증폭비이고, Fig. 4는 최대가속도 별 증폭비이다. Y축 방향 공진주파수가 약 42 Hz 이므로 30 Hz~50 Hz 주기하중실험에서 수평방향의 증폭이 크게 발생하는 것을 확인하였으며, 증폭의 원인은 공진으로 인한 증폭으로 판단된다. 증폭비와 최대가속도의 관계를 확인한 결과 Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 경향이 나타나지 않았으므로 주기하중의 가속도 크기는 증폭에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

전기기기 부품에 작용한 주기하중은 진동대 가속도가 아닌 지그의 가속도이므로, 지그에서 계측한 최대가속도와 주기를 기준으로 기능이상 여부를 확인하였다. 주기하중 실험 결과 5개의 실험체(TS-1, TS-2, TS-6,



(a) A2/A1



(b) A3/A1

Fig. 3. Amplification factor by frequency

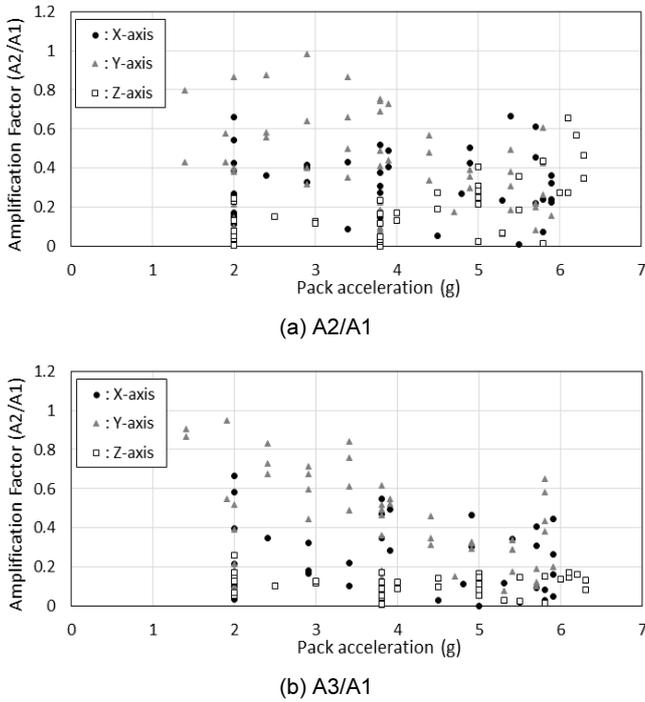


Fig. 4. Amplification factor by pack acceleration

TS-9, TS-10)에서 기능이상이 확인되지 않았다. 나머지 실험체의 주기하중 실험 결과를 Fig. 5~Fig. 11에 나타내었다. TS-3은 진동수 40 Hz, 최대 가속도 9.2 g에서 고장이 발생하였으며, TS-3의 고장으로 인하여 이후 실험이 불가능하여 실험을 중단하였다.

4종의 MCCB를 실험한 결과 3종의 실험체는 기능이상이 확인되지 않았으며, TS-12는 trip이 발생하였다. TS-12는 Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 X축 방향의 주기하중 실험에서 trip이 발생하였다. 진동수 10 Hz~20 Hz 구간에서 최대가속도 7.1 g 이상에서 기능이상이 확인되었다. 40 Hz~50 Hz 구간에서 7.1 g 보다 큰 최대가속도가 발생하였지만 trip이 발생하지 않았다. 따라서 TS-12가 가장 취약한 진동수가 10 Hz~20 Hz구간인 것으로 판단된다.

TS-4와 TS-8은 1단계 주기하중 실험에서 chattering이 확인되지 않았으나 2단계 주기하중 실험에서 chattering이 확인되었다. TS-5, TS-7, TS-11은 1단계 주기하중 실험과 2단계 주기하중 실험에서 chattering이 확인되었다. Fig. 6~Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 진동수와 최대가속도가 높을수록 chattering이 발생함을 확인할 수 있었다. 5개의 실험체(TS-4, TS-5, TS-7, TS-8, TS-11)는 2단계 주기하중 실험이 1단계 주기하중 실험 보다 진동수와 최대가속도가 낮은 실험에서 기능이상이 확인되었다. 실험체를 다회 실험을 수행하여 실험체의 피로에 의한 성능저하가 발생하는 것

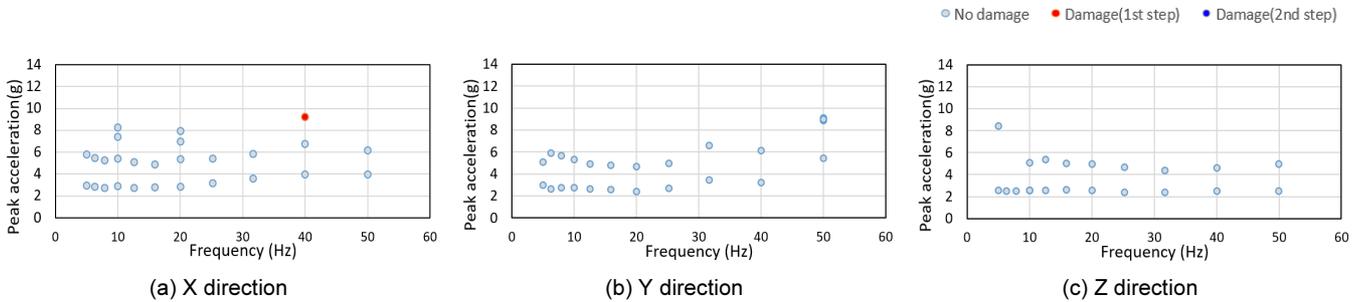


Fig. 5. Results summary (TS-3)

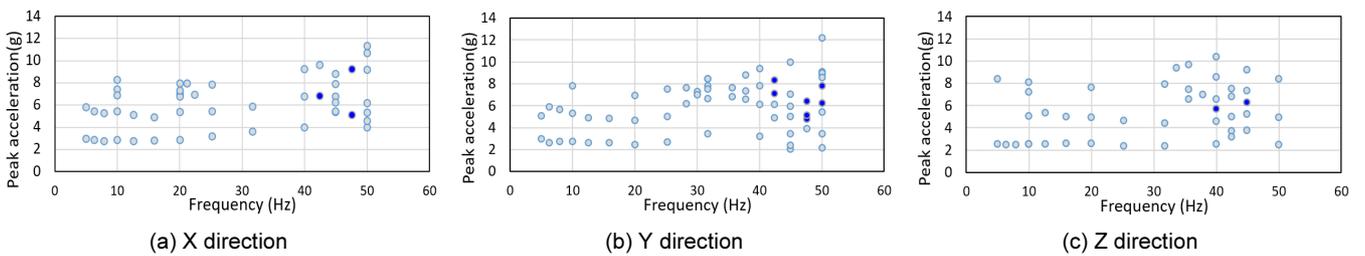


Fig. 6. Results summary (TS-4)

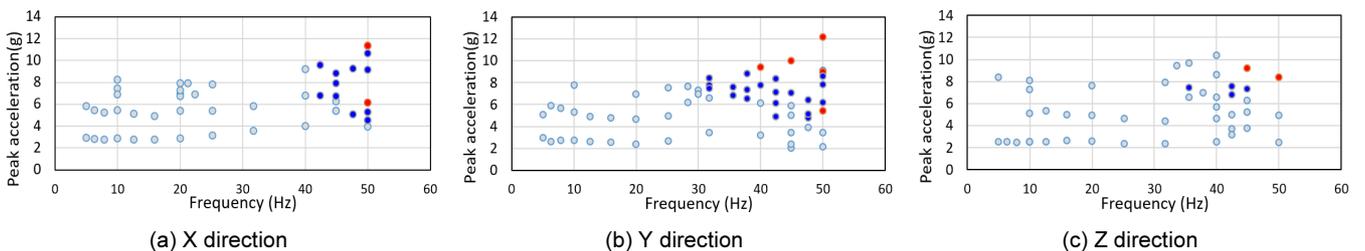


Fig. 7. Results summary (TS-5)

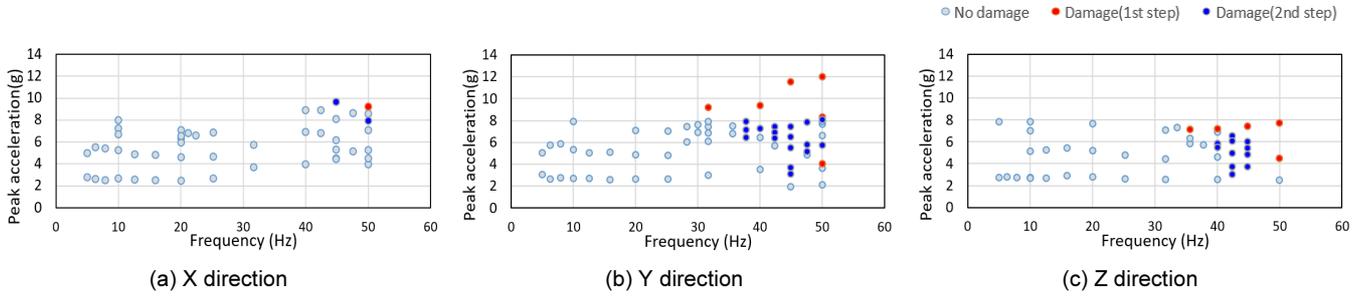


Fig. 8. Results summary (TS-7)

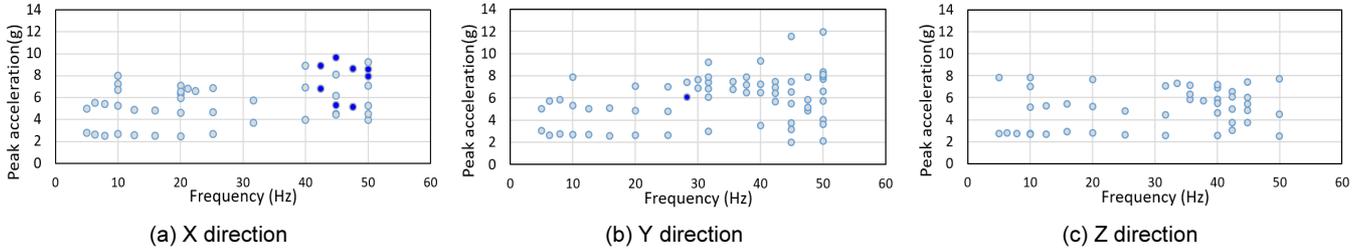


Fig. 9. Results summary (TS-8)

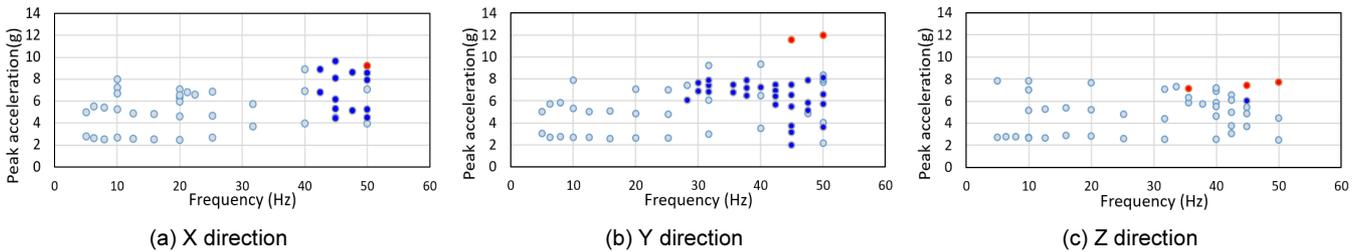


Fig. 10. Results summary (TS-11)

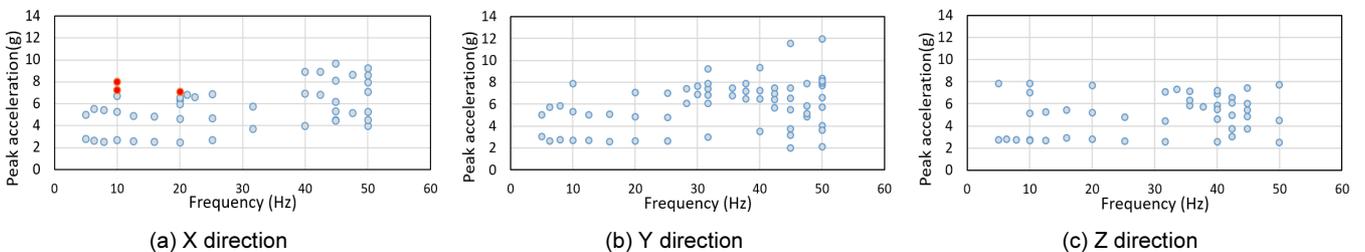


Fig. 11. Results summary (TS-12)

으로 판단된다. 따라서 기능이상이 발생한 부품은 성능저하가 발생할 수 있으므로 부품 교체가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

원자력발전소를 운영하기 위한 다양한 전기기기가 설치되어 있으며, 전기기기 중 다수는 발전소의 지진에 대한 안전을 확보하기 위하여 지진 발생 시 기능 유지가 요구된다. 지진사고 발생 시 전기기기는 구조손상과 기능 이상이 발생할 수 있다. 구조손상은 전기기기의 구조 보강을 통하여 방지 가능하나, 기능이상은 부품의 성능에 따라 좌우된다. 따라서 부품의 내진 성능을 정확히 파악하여 설계에 효과적으로 적용할 필요가 있다.

본 논문에서는 원자력 발전소에 설치되고 있는 캐비닛형 기기에 설치되고 있는 12개의 부품에 대한 내진 성능을 확인하기 위하여 진동대 실험을 수행하였다. 진동대를 이용한 내진 성능 확인은 일반적으로 지진모사 실험을 수행하나 본 논문에서는 주기하중 실험을 통하여 내진 성능을 확인하였다. 지진하중에는 저진동수부터 고진동수까지 다양한 진동수를 포함하고 있으므로 어떤 진동수의 영향으로 부품의 손상이 발생하였는지 파악이 어렵다. 따라서 다양한 진동수에 대한 주기하중 실험으로 부품의 주기에 대한 성능을 확인하였다. 또한 가속도의 크기를 다양하게 적용하여 주기하중 실험을 수행하였다. 부품의 내진 실험을 여러 차례 진행하기 위하여 저진동수와 작은 최대가속도부터 고진동수와 큰 최대가속도까지 순차적으로 실험을 수행하였다. 실험체의 피로를 최소화하기 위하여 2단계로 나누어 실험을 수

행하였다. 1단계 실험은 진동수와 최대가속도의 간격을 넓게 수행하였으며, 1단계 실험에서 기능이상이 확인된 진동수와 최대가속도보다 작은 진동수와 가속도에 대한 2단계 주기하중실험을 수행하였다.

실험 결과 12개의 실험체 중 5개의 실험체는 기능이상이 확인되지 않았다. 1단계부터 기능이상이 발생한 실험체는 12개 중 5개다. 5개의 실험체 중 1개의 실험체는 기능이상이 발생과 동시에 고장이 발생하였다. 1개의 MCCB에서는 trip이 발생하였으며, 3개의 relay는 2 ms 이상의 chattering이 확인되었다. TS-12를 제외하면 1단계 실험에서 기능이상이 발생한 최소진동수는 31.7 Hz이고 최대가속도의 최솟값은 4.05 g이었다. 2단계 실험에서 기능이상이 발생한 진동수의 최솟값은 28.3 Hz이고 최대가속도의 최솟값은 1.96 g이었다. 또한 기능이상이 확인된 실험체 중 2개의 실험체는 1단계 실험에서 기능이상이 확인되지 않았으나, 2단계 실험에서 기능이상이 확인되었다. 부품의 계속된 실험에 의한 누적 피로에 의하여 기능이상이 발생하는 최대가속도가 낮아지는 것으로 판단된다.

TS-12를 제외한 6개 부품에서는 30 Hz 이상의 진동수에서 기능이상이 확인되었다. 캐비닛형 기기의 1차 고유진동수는 10 Hz에서 20 Hz인 경우가 많으므로 부품이 기능이상이 발생하는 진동수가 1차 고유진동수와 차이가 있다. 따라서 부품의 취약한 진동수와 캐비닛형 기기의 1차 고유진동수의 차이가 있으므로 부품의 공진에 의한 손상의 우려는 적을 것으로 판단된다.

주기하중실험 결과 진동수가 높고, 최대가속도가 클수록 기능이상의 발생 우려가 커짐을 실험을 통하여 확인하였다. 부품에 기능이상이 발생한 이후에는 기능이상이 발생한 진동수와 최대가속도 보다 낮은 진동수와 낮은 최대가속도에서 기능이상이 발생하므로 기능이상이 발생한 부품은 내진성능이 저하되는 것으로 판단된다. 따라서 캐비닛에 설치되는 부품에 진동수와 최대가속도가 높게 발생하지 않도록 캐비닛을 설계하면 캐비닛의 기능적 성능의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지진발생으로 인하여 발전소에 설치된 전기기기의 기능이상이 발생하면 교체가 필요한 부품들을 교체하여 내진성능을 확보해야 할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(설계초과 강진 대비 열화기기 지진안전성 향상 및 내진보강기술개발, No. 20224B10200080)입니다.

/ REFERENCES /

1. Chang SJ, Park DU, Jeong YS, Evaluation of MCC seismic response according to frequency contents by shake table test, Nuclear Engineering and Technology, 2021;53(4):1345-1356.
2. Jeong YS, Chang SJ, Kim SW, Park JH, Park DU, Fragility comparison of battery chargers for nuclear power plants depending on reinforcement of supporting for massive components, Trans Korean Soc Noise Vib Eng. 2023;33(3):264-272.
3. Lee GH, Kim JM, Kim SY, Seismic retrofitting of cabinet structures in nuclear power plant, EESK J Earthquake Eng. 2003 Aug;7(4):31-37.
4. Lee GH, Ha DH, The Optimum Damping Retrofit for Cabinet Structures of NPP for μ -GA, EESK J Earthquake Eng. 2005 Feb;9(1):1-7.
5. EPRI, Guidelines for Development of In-Cabinet Seismic Demand for Devices Mounted in Electrical Cabinets, NP-7146-SL R1, Woburn; c1995.
6. Cho SG, So G, Han M, Kim D, Comparative evaluation of in-cabinet amplification factor for devices mounted in electrical cabinets, Proceeding of KNS 2016 Autumn Meeting; 2016 Oct 26-28; Gyeongju, Korea Nuclear Society; c2016.
7. Gupta A, Yang SK, Gupta AK, Ritz vector approach for evaluating incabinet response spectra, Nucl Eng Des, 1999;217:49-62.
8. Richards J, Merz K, Hardy G, High frequency seismic testing of potentially sensitivity components, SMiRT-23; 2015 Aug 10-14; Manchester, UK, IASMiRT; c2015.
9. Tseng YD, Chang WF, Gau YC, A relay fragility test experience of nuclear power plant in Taiwan, SMiRT-23; 2015 Aug 10-14; Manchester, UK, IASMiRT; c2015.
10. ANSI/IEEE C37.98, IEEE standard seismic testing of relays; c1987.