

# 유사 성능 기기의 지진에 대한 거동특성 분석

## Behavioral Characteristics Analysis for Earthquakes of the Similar Performance Equipment

장 성 진\* · 정 영 수\* · 전 범 규\* · 박 동 옥†

Sung-Jin Chang\*, Young-Soo Jeong\*, Bub-Gyu Jeon\* and Dong-Uk Park†

(Received December 30, 2022 ; Revised February 3, 2023 ; Accepted February 7, 2023)

**Key Words :** Electric Cabinet(전기캐비닛), Motor Control Center(전동기 제어반), Shaking Table Test(진동대 시험), Sismic Performance(내진성능)

### ABSTRACT

Damage to nuclear power plants results in loss of life and environmental disasters. Safety-related equipment installed in the nuclear power plants are controlled by electrical control equipment. Safety-related equipment are required to have seismic performance. In this study, the seismic performance of the motor control center (MCC), an electrical control equipment, is tested. Therefore, a shaking table test was conducted using the design response spectrum and uniform hazard spectra. The equipment installed in the nuclear power plants are supplied by various manufacturers. Because the seismic performance of MCC varies depending on the design and manufacturing method, the shaking table test is conducted for two different MCCs with the same function. The dynamic characteristics and shapes of two different types of MCCs were compared, and the seismic performance according to the shape was examined. Additionally, the difference in seismic performance according to the structural shape was examined through seismic fragility tests.

### 1. 서 론

대한민국은 전력의 약 30%를 원자력 발전소가 담당하고 있으므로 원자력 발전소 설비의 손상으로 인한 전력 공급차질은 국가의 운영 및 국민의 생활에 큰 문제를 야기시킬 수 있다. 또한 원자력 발전소의 사고는 인명피해 및 환경 재해를 야기할 수 있다. 2011년 일본 동북부 지방에서 지진과 쓰나미가 발생하였고, 후쿠시마현에 위치한 원자력 발전소가 손상되어 가동 중지 및 방사능이 누출되었다<sup>(1)</sup>. 또한 대한민국에 경

주(2016년)와 포항(2017년)에서 규모 5.0 이상의 지진이 발생하였다. 후쿠시마 원전사고와 대한민국에 발생한 규모 5.0 이상의 지진으로 인해 원자력 발전소의 지진에 대한 안정성에 관심이 증가하였고, 원자력 발전소의 내진성능 향상을 위한 연구가 진행 중이다.

초기의 원자력 발전소는 미국 서부지역의 지진을 기초로 생성된 U.S. NRC Regulatory Guideline 1.60(R.G. 1.60)<sup>(2)</sup> 스펙트럼을 이용하여 설계하였으며, 국내에 건설된 원자력 발전소도 R.G. 1.60에서 제시하고 있는 스펙트럼을 이용하여 설계되었다. 그러나 2016년 한국수력원자력 본사가 위치한 경주에서 고주

† Corresponding Author ; Member, Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Professor  
E-mail : kwenry@pusan.ac.kr

\* Seismic Research and Test Center, Pusan National University

‡ Recommended by Editor Jong Moon Ha  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

파수 성분이 많이 포함된 규모 5.8의 지진이 발생하였다. 또한 대한민국에서 발생한 지진에 대한 연구 결과 10 Hz ~ 30 Hz의 고주파수 성분을 많이 포함하고 있는 것으로 파악되었다<sup>(3-6)</sup>. 그러므로 고주파 성분이 많이 포함된 지진이 대한민국에 위치한 원자력 발전소에 발생할 가능성이 높다. 또한 약 6.5 규모의 지진이 대한민국에 발생할 가능성이 있다는 연구가 진행되어 있다<sup>(7,8)</sup>. 따라서 대한민국에 건설되는 원자력 발전소의 지진에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 국내에 발생하는 지진을 고려한 내진성능의 확인이 필요하다.

원자력 발전소에서 운용하고 있는 안전관련 전기제어설비들은 전기캐비닛 기기들이다. 안전관련 전기 기기들은 원자력 발전소에 납품을 위해 내진검증을 수행한다<sup>(9)</sup>. 전기제어설비들의 내진성능의 확인은 구조 해석 및 시험으로 확인할 수 있다. 그러나 전기제어설비들은 내부에 전기부품들이 복잡하게 연결되어 있어 수치해석모델의 구현이 어려운 실정이다. 따라서 시험을 이용한 내진성능검증이 많이 이루어지고 있다<sup>(10)</sup>.

전기제어설비의 안전성을 확인하기 위하여 전기캐비닛의 거동 특성에 대한 다양한 연구가 진행 중이다. 앵커부의 거동특성에 의한 로킹 현상이 연구<sup>(11,12)</sup>된바 있으며, 해석을 통한 전기캐비닛 내부의 응답을 비교한 연구<sup>(13)</sup>가 수행되었다. 또한 전기캐비닛의 내부 응답의 증폭에 대한 연구<sup>(14)</sup>가 진행되어 있다.

이 논문에서는 전기제어설비 중 전동기제어반(motor control center, MCC)을 이용한 내진실험을 수행하였다. 설계지진하중과 국내에 발생하는 지진의 특성이 고려된 지진하중으로 MCC의 내진성능을 확인하는 실험을 수행하였다. 또한 MCC의 한계상태 내진성능을 확인하기 위한 내진실험을 수행하였으며, 사용한 지진하중은 설계지진하중과 국내의 지진특성이 고려된 지진하중을 모두 고려하였다.

원자력 발전소에 설치되는 기기들의 발주는 입찰을 통해 이루어지고, 원자력 발전소에서 요구하는 기계적 성능을 만족하는 기기를 보유한 여러 업체에서 기기를 납품하게 된다. 따라서 기계적 성능이 동일한 제품을 다양한 업체에서 기기를 제공받아 원자력 발전소에 설치하고 있다. 업체에 따라 기계적 성능이 동일한 제품이라도 기기의 구조와 형상이 다르므로 기기의 동특성이 다르게 되고, 기기에 따라 내진성능의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 두 종류의 기계적 성능이 동일한 MCC에 대한 내진실험

을 수행하여 형상과 동특성의 차이에 따른 내진성능의 차이를 확인하였다.

## 2. MCC의 진동대 실험

### 2.1 실험체

기계적 성능이 동일한 다른 MCC의 지진에 대한 거동특성을 확인하기 위하여 두 종류의 MCC를 선정하여 내진실험을 수행하였다. 내진실험에 사용하는 MCC는 원자력 발전소에 설치되고 있는 MCC의 기계적 성능과 유사하도록 제작되어졌다. MCC는 2열 양면형(MCC1)과 3열 양면형(MCC2)으로 제작되었다. MCC1은 8개 모터의 제어가 가능하며, MCC2는 18개 모터의 제어가 가능하도록 제작되었다. 실험에 사용한 MCC는 Fig. 1과 같으며, 규격은 Table 1과 같다.

MCC의 진동대 고정을 위하여 바닥판을 MCC에 용접으로 접합하였으며, 바닥판을 진동대에 M24 볼트를 이용하여 설치하였다. MCC의 하부와 상부의 상대변위를 측정하기 위하여 X축 방향과 Y축 방향으로 LVDT를 설치하였다. MCC의 높이에 따른 가속도변화를 확인하기 위하여 외부에 5개의 가속도센서(3축)를 설치하였으며, 진동대의 응답을 확인하기 위하여 진동대에 1개의 가속도센서를 설치하였다.

### 2.2 지진하중

진원에 발생한 지진하중은 지반과 건물을 통해 지진하중이 변하며, 이렇게 변한 지진하중이 기기에 지진하중으로 작용한다. 그리고 MCC와 같은 기기의 외함(캐비닛)을 통하여 변화된 지진하중이 내부 부품들에게 영향을 미치게 된다. 따라서 캐비닛의 내진실험을 수행하기 위해서는 기기가 설치된 위치의 층응답스펙트럼이 필요하다. 일반적인 건물의 경우 해석을 수행하지 않는 경우가 많기 때문에 실험체의 종류에 따라 적합한 시험기준을 적용하여 실험을 수행하게 된다. 그러나 원자력 발전소와 같은 안전성이 요구되는 구조물의 경우 설계지진하중(R.G. 1.60)에 의해 구조물에 발생하는 층응답스펙트럼이 도출되어있다.

설계지진하중은 국내의 지반특성이 고려되지 않은 지진하중이므로 국내에 현실적으로 발생 가능한 지반응답스펙트럼(uniform hazard spectra, UHS)을 고려한 층응답스펙트럼을 입력하중으로 선정<sup>(15)</sup>하였다. 이 연구에선 설계지진하중과 현실적인 지진하중을 이용

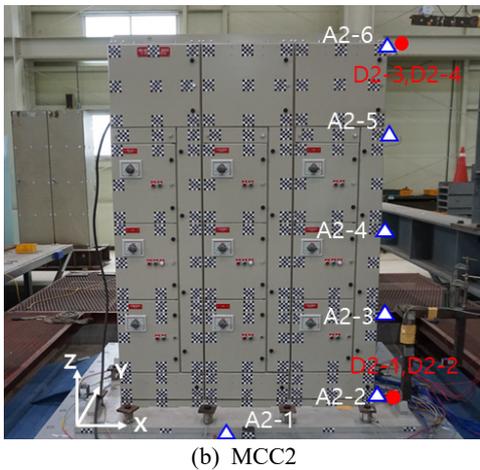
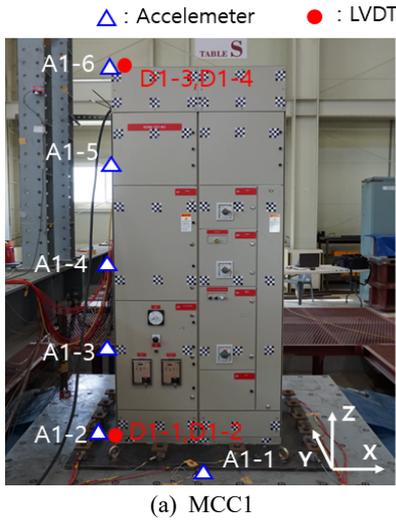


Fig. 1 Specimens

Table 1 Specimens specifications

Specimen	Dimensions [mm]			Weight [kg]
	Length	Width	Height	
MCC1	550	1140	2650	1290
MCC2	550	1695	2350	1934

하여 내진실험을 수행함으로써 발전소에 설치되는 기기의 내진성능을 확인하였다.

또한 원자력 발전소에 설치되고 있는 기계적 성능이 동일한 기기에 대하여 동일한 한계상태 실험을 수행하여 유사한 내진성능을 가지는지 비교실험을 수행하였다. 한계상태 실험에 사용된 스펙트럼은 설계지

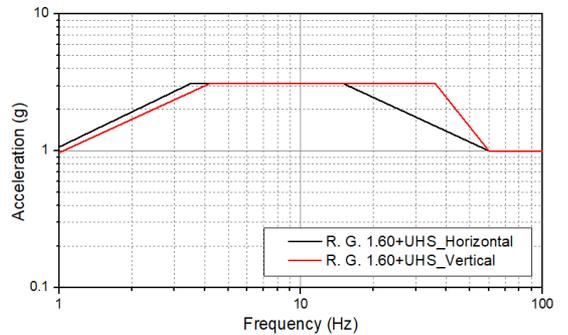
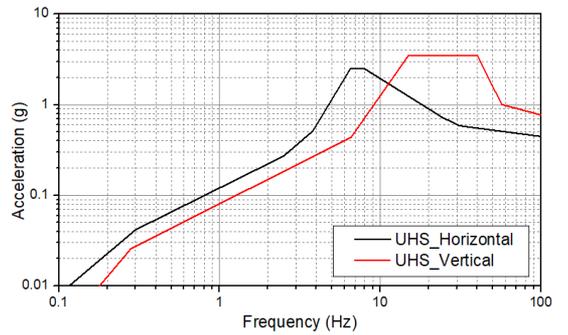
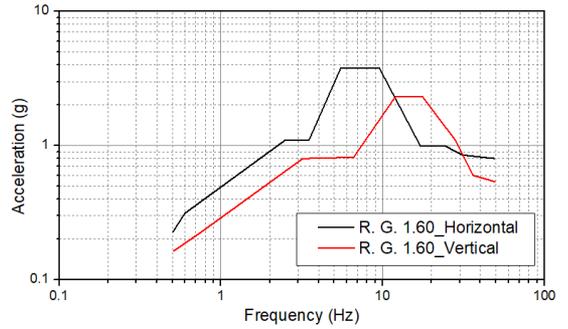


Fig. 2 Seismic-load floor response spectrum

진하중과 현실적인 지진하중을 모두 고려한 스펙트럼이다. Fig. 2는 실험에 사용한 층응답스펙트럼이다.

### 2.3 실험 절차

MCC의 구조적 성능 및 기계적 성능이 유지되어야 지속적인 실험이 가능하므로 지진하중이 작은 실험부터 순차적으로 수행하였다. 내진실험에 의한 구조적 손상의 여부를 판단하기 위하여 모든 내진실험 전과 후에 공진탐색시험을 수행하여 동특성 변화를 확인하

였고, 육안검사를 통하여 볼트풀림, 문열림 등을 확인하였다. 실험 중 기기의 기능이상을 확인하기 위하여 전원 상태와 trip 여부를 확인하였다. 이 실험은 원자력 성능시험 인증기관인 지진방재연구센터(SESTE C)에서 6자유도 진동대를 이용하여 수행하였다. Table 2는 실험 순서이며, MCC1과 MCC2를 동일한 실험순서에 따라 실험을 진행하였다.

설계지진하중과 현실적인 지진하중에 의한 MCC의 내진성능을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 지진파의 최대지반가속도 0.2 g가 발생하였을 때 MCC에 작용하는 층응답스펙트럼을 이용하여 내진실험을 수행하였다. 또한 설계지진하중과 현실적인 지진하중을 모두 고려한 스펙트럼을 이용하여 한계상태 내진실험을 수행하였다. 한계상태 실험은 기기의 손상이 발생할 때까지 진행하였다. 유도된 각각의 응답스펙트럼에 대한 각 방향 요구응답스펙트럼(RRS)을 만족하는 지진파를 3축 동시 가진하여 내진실험을 진행하였다.

진동대시험의 입력지진의 강도는 지진취약도 곡선을 바탕으로 정의하였다. 한계상태실험은 HCLPF와 fragility test는 Fig. 2(c)의 스펙트럼을 점진적으로 증폭하여 적용하되, 증가율은 HCLPF와 파괴확률의 10% 간격에 해당하는 PGA를 적용하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 공진주파수

MCC의 공진주파수를 확인하기 위하여 식 (1)과 같은 전달함수를 이용하였다. 전달함수( $T_{xy}$ )는 공진주파수 탐색시험 동안 진동대( $x$ )에서 입력된 가속도

와  $MCC(y)$ 의 응답가속도의 비를 이용하였다.

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

여기서,  $P_{yx}$ 는 두 신호의 cross power spectral density이고,  $P_{xx}$ 는 power spectral density이다. 공진 주파수 탐색 시험 결과의 정확성을 높이기 위하여 각각의 가속도 신호에 symmetric hamming window를 적용하였다. Table 3은 공진탐색실험을 통하여 추정된 공진주파수이다.

MCC1은 X축 방향의 내부 보강이 있는 구조이고 MCC2는 X축 방향의 내부 보강이 없어 고유진동수의 차이가 있었다. MCC2의 측면 판넬은 Y축 방향의 강성을 높여주지만, 전후면의 문은 강성을 높여주지 못하므로 Y축 방향의 공진주파수가 X축 방향의 공진주파수 보다 높게 추정된 것으로 판단된다.

공진탐색실험 결과 HCLPF 실험까지 공진주파수의 변화가 10% 미만으로 발생하였다. Fragility 10% 실험에서 MCC1의 X축은 42.1%, Y축은 7.9%의 공진주파수 변화가 발생하였으며, MCC2의 X축은 17.5%, Y축은 12.2%의 공진주파수 변화가 발생하였다. 측면 판넬로 강성을 유지하는 Y축의 공진주파수는 변화가 작았으며, 부재를 볼트로 연결하여 강성을 유지하는 X축의 공진주파수는 변화가 크게 발생한 것으로 판단된다.

#### 3.2 기능검사와 육안검사

내진실험으로 인한 MCC의 이상 여부를 확인하기 위하여 모든 내진실험의 전과 후에 기능검사와 육안

Table 2 Loading case of shaking table test

Test case		Test name	PGA
MCC1	MCC2		
Case 1-1	Case 2-1	R.G. 1.60	0.200 g
Case 1-2	Case 2-2	UHS	0.200 g
Case 1-3	Case 2-3	R.G. 1.60 + UHS	0.200 g
Case 1-4	Case 2-4	HCLPF (R.G. 1.60 + UHS)	0.470 g
Case 1-5	Case 2-5	Fragility 10% (R.G. 1.60 + UHS)	1.100 g

Table 3 Resonant frequency search test summary

Test name	Predominant resonant frequency					
	MCC1			MCC2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Before seismic test	19.00	19.00	47.50	11.25	20.50	-
After R.G. 1.60	18.25	18.50	47.50	10.75	19.75	-
After UHS	18.25	18.25	47.25	10.50	20.25	-
After R.G. 1.60 + UHS	18.25	18.25	47.25	10.50	20.00	-
After HCLPF	17.25	18.25	47.00	10.75	19.75	-
After fragility 10%	11.00	17.50	47.25	9.28	18.00	-

검사를 수행하였다. 육안검사에서 MCC의 육안으로 확인 가능한 구조적 손상을 확인하였으며, 실험 중 및 실험 후 MCC의 정상작동 여부를 확인하였다. 공진주파수의 변화로 육안으로 확인되지 않는 구조적인 손상 및 변화를 파악하였다.

MCC1과 MCC2 모두 HCLPF 실험까지 공진주파수의 변화는 있었으나 기능이상과 육안검사에서 손상이 확인되지 않았다. Fragility 10% 실험에서 MCC1은 배전용차단기(MCCB, molded case circuit breaker) 1개소에서 trip이 발생하였으며, Fig. 3(a)와 같이 볼트 파손이 확인되었다. MCC2는 배전용차단기 2개소에서 trip이 발생하였으며, 문 열림과 Fig. 3(b)와 같이 볼트 파손이 확인되었다.

형상과 제작방법이 다름에 따라 공진주파수가 다른 두 종류의 MCC에서 동일한 내진실험에서 구조적 손상과 기능이상 발생하였다. 또한 기능이상과 구조적 손상이 동시에 발생함을 확인할 수 있었다. 구조적 손상으로 MCC 캐비닛의 변형이 커지는 것은



(a) MCC1



(b) MCC2

Fig. 3 Visual inspection result

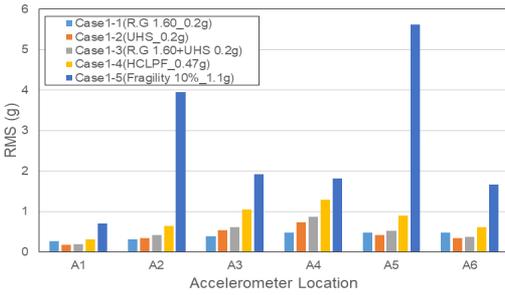
확인되었으나, 이 변형의 커짐으로 인해 기능이상이 발생한 것인지는 확인할 수 없었다. 그러나 구조적 변형으로 인해 가속도와 변위 응답의 증폭이 기능이상에 영향을 미쳤을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

### 3.3 가속도 응답 비교

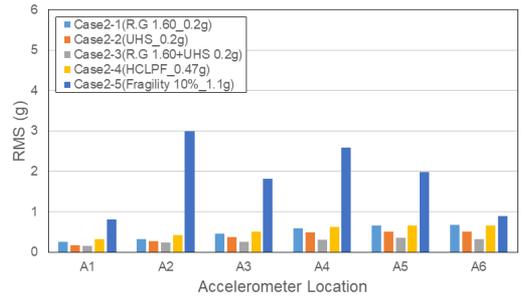
입력하중에 따라 MCC에 부착된 가속도센서의 위치에 따른 가속도 응답의 변화를 확인하였다. 가속도 응답의 최대값은 MCC 내부 부품들의 떨림에 의한 충격하중이 발생할 수 있으므로 가속도응답의 최대값을 비교하는 것은 왜곡이 발생할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 가속도의 RMS값을 비교하였으며, Fig. 4와 Fig. 5와 같이 RMS를 도출하였다. 수평방향은 높이가 높을수록 MCC의 변형량이 크므로 높은 위치의 가속도응답의 RMS가 크게 발생하는 것으로 판단되며, 수직방향은 높이에 따른 MCC의 변화가 크게 발생하지 않으므로 높이에 따른 가속도응답의 변화가 작은 것으로 판단된다.

입력되는 지진하중이 MCC를 통과하여 어떻게 변화하는지를 확인하기 위하여 입력되는 지진하중의 크기와 출력되는 지진하중의 크기를 비교하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 입력되는 지진하중과 출력되는 지진하중의 RMS 비율을 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 MCC1의 경우 설계지진하중은 증폭량이 크지 않은 것을 확인되었으나, MCC2의 경우 설계지진하중에 영향을 크게 받지 않는 것을 확인하였다. MCC1의 X축과 Y축 1차 공진주파수는 19 Hz이고, MCC2의 X축 1차 공진주파수는 11.25 Hz, Y축 1차 공진주파수는 20.5 Hz이다. 그러므로 설계지진스펙트럼의 최대가속도 진동수에 MCC2의 X축 1차 공진주파수가 위치하고 있으므로 MCC1 X축 방향 증폭량보다 MCC2 X축 방향의 증폭량이 크게 발생한 것으로 판단된다. MCC1의 X축 1차 공진주파수가 설계지진하중의 강진구간과 차이가 크므로 증폭이 크게 발생하지 않은 것으로 판단된다.

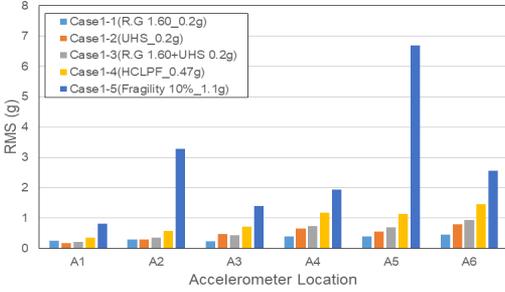
MCC1의 fragility 10% 실험에서 A2, A5 위치에서 계측된 가속도응답과 MCC2의 fragility 10% 실험에서 A2 위치에서 계측된 가속도응답이 크게 발생하였다. Fragility 10% 실험에서 MCC 내부의 볼트의 풀림 혹은 볼트가 파손되면서 내부 연결부의 떨림이 발생하고 떨리는 위치에 가까운 가속도센서에서 응답이 증폭되는 현상이 발생하였을 것으로 판단된다.



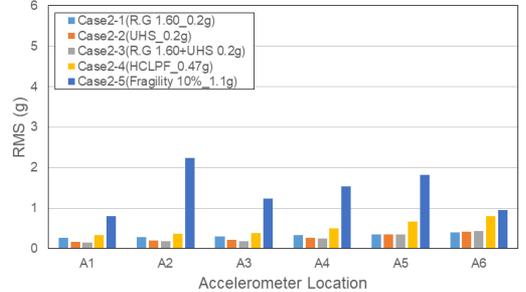
(a) x-axis



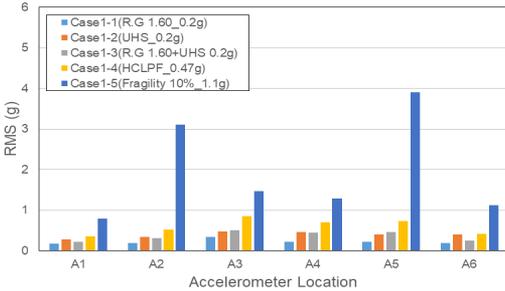
(a) x-axis



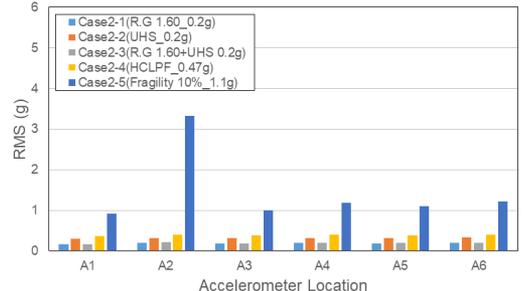
(b) y-axis



(b) y-axis



(c) z-axis



(c) z-axis

Fig. 4 RMS of acceleration signal measured by MCC1

Fig. 5 RMS of acceleration signal measured by MCC2

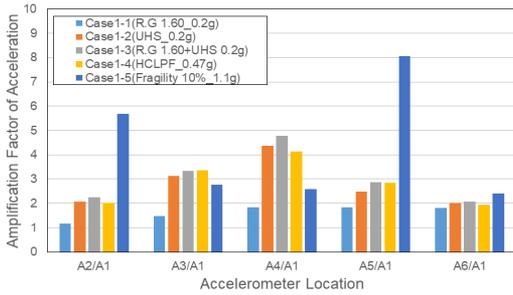
### 3.4 변위 응답 비교

MCC의 상부와 하부의 상대변위를 계측하여 MCC의 거동특성을 확인하였다. Fig. 8과 Table 4는 상대변위를 나타낸 것이다. 지진하중이 커질수록 상대 변위가 커지는 것을 확인할 수 있었다. Case 2-5는 실험 중 기기의 파손이 확인되어 실험 중 가력을 중지하여 20초까지 데이터가 수집되었다.

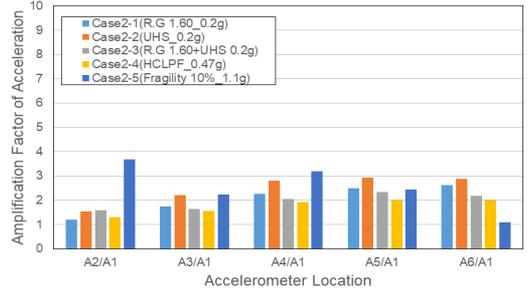
MCC1과 MCC2의 X축 방향의 상대변위가 Y축 방향의 상대변위에 비하여 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. MCC 내부의 X축 방향은 부재가 볼트로 연결되어 강성을 유지하고, Y축 방향은 측면 판넬이 강성을 유지하도록 설계되어져 있다. 따라서 볼트로 연결된

부재들은 볼트 풀림에 의하여 이격이 발생할 수 있어 X축 변위가 Y축 변위에 비하여 크게 발생하는 것으로 판단된다. 또한 fragility 10% 실험에서 볼트 파손으로 인하여 상대변위가 크게 발생한 것으로 판단된다.

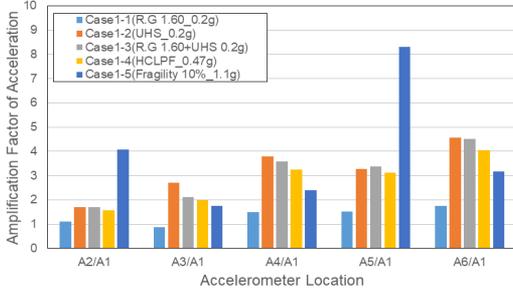
MCC2의 X축 방향 상대변위가 MCC1의 X축 방향 상대변위에 비하여 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. MCC2의 X축 방향 공진주파수가 실험에 사용한 층응답스펙트럼의 최대가속도가 형성되는 주파수와 유사하므로 변형이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 기기의 설계 단계에서 최대 가속도가 발생하는 주파수 범위에 공진주파수가 포함되지 않도록 설계하는 것이 지진에 의한 변형을 최소화시키는 방법이다.



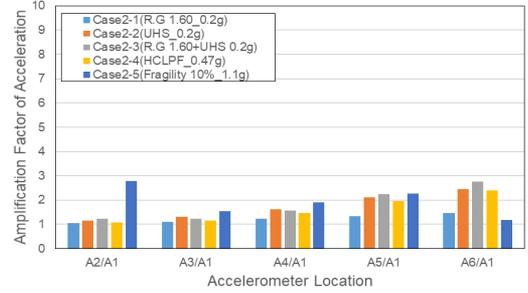
(a) x-axis



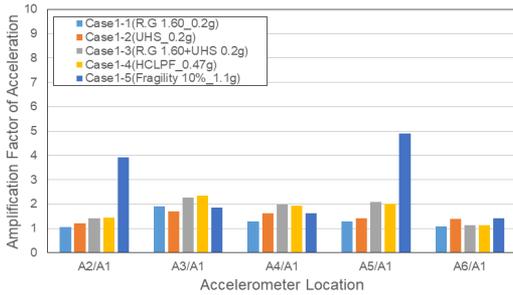
(a) x-axis



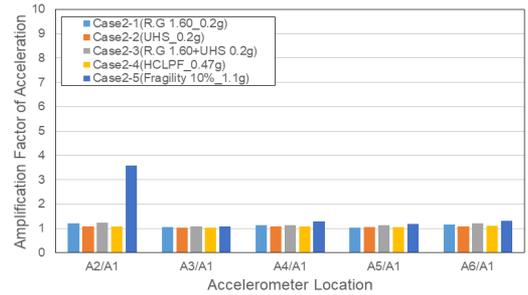
(b) y-axis



(b) y-axis



(c) z-axis



(c) z-axis

Fig. 6 Amplification factor by MCC1

Fig. 7 Amplification factor by MCC2

### 5. 결론

원자력 발전소에 기기를 납품하는 제조사에 따라 기계적 성능이 동일한 기기라도 설계와 제작 방법이 다르므로 내진성능의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 기계적 성능이 동일한 기기에 대한 성능차이를 확인하기 위하여 제조사가 다른 두 종류의 MCC에 대한 내진실험을 수행하였다. 내진실험은 제작한 두 종류의 MCC에 동일한 절차로 실험을 진행하였으며, 계측 센서의 설치 위치도 유사하게 선정하였다. 또한 두 종류의 MCC의 한계상태를 확인하기 위하여 한계상태 내진실험을 수행하였다.

내진실험 중 기기의 구조적 변화를 확인하기 위하여 내진실험 전과 후에 공진탐색실험을 수행하였다. 공진탐색 실험 결과 MCC1의 X축 방향과 Y축 방향의 1차 공진주파수는 19.00 Hz로 동일하였다. MCC2의 X축 방향의 1차 공진주파수는 11.25 Hz이고, Y축 방향의 1차 공진주파수는 20.50 Hz였다. MCC 간의 X축 방향 공진주파수가 40% 이상 차이가 있는 것을 확인하였다. MCC1은 내부에 X축 방향으로 판넬이 부착되어 강성이 높은 구조이고 MCC2는 X축 방향으로 보강판넬이 없으므로 X축 방향 공진주파수가 차이는 것으로 확인되었다.

공진탐색실험 결과 HCLPF 실험까지 공진주파수

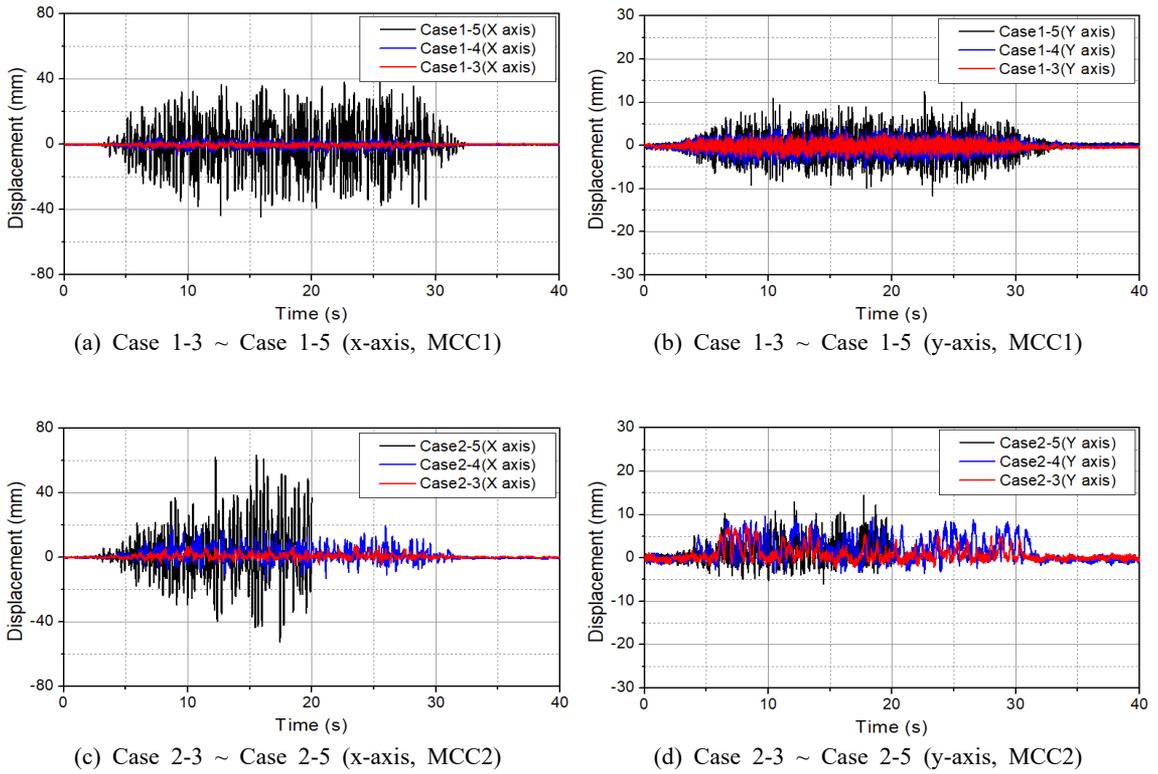


Fig. 8 Comparison of relative displacement

Table 4 Comparison of relative displacement [mm]

Test name	MCC1		MCC2	
	X axis	Y axis	X axis	Y axis
R.G. 1.60	6.24	4.30	21.90	7.64
UHS	3.84	3.86	10.30	2.50
R.G. 1.60 + UHS	4.60	3.49	8.08	7.53
HCLPF (R.G. 1.60 + UHS)	7.06	5.47	19.59	9.62
Fragility 10% (R.G. 1.60 + UHS)	44.54	12.44	63.24	14.39

의 변화가 10% 미만이었다. Fragility 10% 실험에서 MCC1의 X축은 42.1%, Y축은 7.9%의 공진주파수 변화가 발생하였으며, MCC2의 X축은 17.5%, Y축은 12.2%의 공진주파수 변화가 발생하였다. Y축 방향의 강성에 영향을 미치는 측면 판넬과 상부 판넬 및 골조는 용접으로 연결되어 있어, 공진주파수의 변화가 12.2% 이하로 발생하였다. 그러나 X축 방향의 강성에 영향을 주는 내부 보강은 볼트로 연결되어 있으므로, Y축 방향의 공진주파수 변화에 비하여 큰 변

화가 발생하는 것을 판단된다. 또한 내부 판넬이 있는 MCC1의 경우 내부 판넬을 연결하고 있는 볼트가 풀려 고유진동수가 42.1% 하락한 것으로 판단된다.

Fragility 10% 실험에서 상대변위와 가속도 응답이 HCLPF 이전 실험보다 크게 발생하였다. 지진하중이 커지면서 MCC 내부 볼트가 풀림에 따라 MCC 내부의 충격이 발생하고 변형량도 커지게 되어 가속도와 상대변위가 커진 것으로 판단된다. 따라서 연결 볼트의 직경이 커지거나 볼트접합이 아닌 용접으로 연결한다면 강성저하가 크지 않아 가속도와 상대변위가 이 실험보다 작게 발생하였을 것으로 판단된다. 그러나 이 실험에서 사용한 설계지진하중과 현실적인 지진하중 발생 시 MCC의 구조적 손상이 확인되지 않았으므로 충분한 성능을 가지고 있다.

실험 결과 MCC1과 MCC2의 구조적 손상이 발생한 시점과 기능이상 발생 시점이 동일하므로 형상과 제작방법은 다르더라도 유사한 내진성능을 구현하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기능이상과 구조적 손상이 같은 지진실험에서 발생하였다. 이는

기능이상과 구조적 손상이 동시에 발생한 것인지 구조적 손상에 의한 MCC 변형량의 증가로 기능이상 발생했는지 확인이 필요하다. MCC의 보강을 통하여 구조적으로 fragility 10% 실험에서 이상이 없도록 설계하고 fragility 10%에서 기능이상 발생하였는지 확인하는 추가 연구가 필요하다.

## 후 기

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

## References

- (1) Tokyo Electric Power Company, 2012, Fukushima-daiichi Nuclear Accident Analysis Report.
- (2) US Nuclear Regulatory Commission, 1973, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.60 (Revision 1).
- (3) Choi, I. K., Choun, Y. S. and Seo, J. M., 2002, Re-evaluation of Seismic Fragility Parameters on Nuclear Power Plant Components Considering Uniform Hazard Spectrum, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 34, No. 6, pp. 586-595.
- (4) Joe, Y. H. and Cho, S. G., 2003, Seismic Fragility Analyses of Nuclear Power Plant Structures based on the Recorded Earthquake Data in Korea, Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-17), Prague, Czech Republic.
- (5) Korean Atomic Energy Research Institute, 2003, Evaluation of High Frequency Ground Motion Effects on the Seismic Capacity of Nuclear Power Plant Equipment, Technical Report KAERI 2484.
- (6) Seo, J. M., Choi, I. K., Choun, Y. S. and Lee, J. R., 2003, Seismic Fragility of NPP Components Considering Motions Rich in High Frequency Contents, Proceedings of the Internal Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities, Vienna, Austria.
- (7) Chiu, J. M. and Kim, S. G., 2004, Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula using Historical Earthquake Data Between A.D 2 and 1995, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 94, No. 1, pp. 269-284.
- (8) Seo, J. M., Choi, I. K. and Rhee, H. M., 2010, A Study of the Historical Earthquake Catalog and Gutenberg-Richter Parameter Values of the Korean Peninsula, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 55-64.
- (9) Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013, IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE 344.
- (10) Eem, S.-H., Choi, I.-K. and Ha, J.-G., 2019, Development of Input Response Spectrum Shape for Shaking Table Test of Components Reflecting High-Frequency Earthquake Characteristics, Asian Symposium on Risk Assessment and Management.
- (11) Eem, S. H., Jeon, B. G., Jang, S. J. and Choi, I. K., 2019, Evaluate the Characteristics of Vibration Caused by Rocking Modes of Electric Cabinet under Seismic Loading, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 735-744.
- (12) Yun, D. W., Jeon, B. G., Jung, W. Y., Jang, S. J. and Shin, Y. J., 2019, Analysis of Anchorage Behavior Characteristics of the Electrical Cabinet Using Shaking Table Tests, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 43-50.
- (13) Son, H. Y., So, W. B., Jeon, B. G., Jung, W. Y. and Ju, B. S., 2020, Dynamic Characteristics of Double-door Electrical Cabinet by 3D Finite Element Analysis Model, Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 11, No. 5, pp. 60-66.
- (14) Jeong, Y. S., Eem, S. H., Jeon, B. G. and Park, D. U., 2019, Comparison of Response of Battery Charger in Nuclear Power Plant Depending on Frequency Characteristics in Seismic Motions, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 120-130.
- (15) Eem, S. H. and Choi, I. K., 2020, A Shape of the Response Spectrum for Evaluation of the Ultimate

Seismic Capacity of Structures and Equipment including High-frequency Earthquake Characteristics, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 1~8.



**Sung-Jin Chang** received Ph.D. degree in Civil Engineering from Pusan National University with the topic related with B-WIM (bridge weigh in motion) System using reaction force signals of support bearings. He is currently the research associate in seismic research and test center.



**Dong-Uk Park** received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with improvement of numerical model using wireless measurement on railway bridge. He is currently the verification manager in Seismic Research and Test Center. His research interests encompass seismic evaluation of mechanical and electrical equipment and seismic performance of high frequency motion.