

원전 전기캐비닛의 증폭 효과를 반영한 전기부품의 진동대시험 및 증폭계수 검토

Shaking Table Tests of Electrical Components Reflecting the Amplification Effects of Electrical Cabinets in NPPs and a Review of Amplification Factors

윤 다 운* · 박 동 옥** · 전 범 규** · 이 영 록* · 이 홍 표†

Da-Woon Yun*, Dong-Uk Park**, Bub-Gyu Jeon**, Young-Lock Lee* and Hong-Pyo Lee†

(Received June 17, 2026 ; Revised July 9, 2026 ; Accepted July 10, 2026)

Key Words : Electrical Component(전기부품), Electrical Cabinet(전기캐비닛), Amplification Effect(증폭 효과), Shaking Table Test(진동대시험)

ABSTRACT

Evaluating the seismic performance of electrical equipment and components is essential to ensure the safety of nuclear power plants (NPPs) during earthquakes. In this study, we evaluated the seismic performance of electrical components widely used in Korean NPPs by considering the amplification effects associated with the dynamic characteristics of the equipment and their typical mounting conditions. Test specimens reflecting actual installation conditions were fabricated based on field investigations to examine their seismic performance. The tested components demonstrated satisfactory seismic performance under input motions developed from floor response spectra of Korean NPPs. The results showed that the in-cabinet response spectra (ICRS) varied significantly depending on the mounting location and installation conditions of the components. The results of a comparison with the amplification factors proposed in NUREG/CR-5203 indicated that the resulting ICRS could be underestimated, although cabinet responses were estimated conservatively or similarly.

1. 서 론

지진 발생 시 원전의 안전한 운영을 위하여 전기설비에 대한 내진성능 평가는 매우 중요하다. 국내에서 다수 원전의 여러 전기설비를 대상으로 상업 운전 이

후 기능 상실에 의한 고장모드가 상당수 보고된 바 있다⁽¹⁾. 특히 안전 관련 전기설비들의 기능 상실은 원전의 대형 사고 예방에 심각한 문제를 초래할 수 있으므로 이러한 전기설비들의 내진성능 검증은 반드시 필요하다.

원전의 안전 관련 전기설비 대상으로 IEEE 323에 따라 그 기능 유지를 위한 적격성 및 검증에 대한 기

† Corresponding Author ; Member, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Principal Researcher
E-mail : hongpyo.lee@khnpp.co.kr

* Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Senior Researcher

** Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Chief Researcher

‡ Recommended by Editor Hyuk Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

본적인 요구사항을 제시하고 있다⁽²⁾. 내진성능 검증의 경우 IEEE 344에 따라 수행되며 원전 전기설비의 내진성능과 관련하여 진동대시험에 의한 여러 연구가 수행되고 있다⁽³⁻⁸⁾. 시험적 연구를 통하여 전기설비의 구조적 손상이 기능 고장을 유발 또는 동시에 발생할 수 있음을 확인하였으며 전기부품의 채터링(chattering)의 발생과 입력지진동 사이의 상관관계를 평가하기도 하였다^(9,10). 그러나 원전 내 설치 또는 운용 중인 실제 전기설비의 반출을 통한 성능 검증은 현실적으로 많은 제한이 따른다. 그러므로 견고한 고정지그를 이용하여 전기부품을 장착한 후 진동대에 직접적으로 체결하여 내진성능 확인을 위한 진동대시험을 수행하기도 한다^(11,12).

전기부품은 얇은 여러 패널로 구성된 캐비닛 내부에 장착된다. 따라서 전기부품에 대한 내진성능 평가를 위해서는 장착되는 위치에서의 캐비닛의 동적 증폭 응답인 내부응답스펙트럼(in-cabinet response spectrum, ICRS)의 고려가 매우 중요하다⁽¹³⁾. 일반적으로 ICRS는 해당 건물의 전기설비가 설치되는 위치의 층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)로부터 해당 설비에 대한 증폭계수를 반영하여 내진성능시험을 위한 요구응답스펙트럼(required response spectrum, RRS)로써 적용된다. 이러한 ICRS의 고려를 위하여 안전 관련 전기설비에 대한 증폭계수가 개발 및 제시되었다^(14,15). EPRI NP-6041에서는 지진취약도 및 확률론적 지진안전성 평가를 위하여 다양한 응답 특성을 포괄하기 위한 단일화된 상수로 증폭계수를 제안하였다⁽¹⁶⁾. 그러나 증폭계수는 설비의 동특성, 입력지진동의 주파수 성분, 전기부품의 장착 위치 및 조건에 따른 국부모드(local mode)로 매우 달라질 수 있다. 따라서 전기부품에 대한 내진성능은 장착되는 설비 및 장착 조건 등을 고려한 적절한 ICRS를 반영하여 평가하는 것이 매우 중요하다.

이 연구에서는 국내 원전에서 사용되는 여러 전기부품을 대상으로 전기부품이 장착되는 설비의 동특성과 장착 조건 및 위치 등에 따른 적절한 ICRS를 반영한 내진성능을 확인하고자 하였다. 안전 관련 주요 전기설비 중 하나인 MCC(motor control center)에 장착되는 전기부품들로 구성됨에 따라 원전의 현장조사를 바탕으로 MCC의 동특성을 반영한 캐비닛 모형을 설계하였다. 일반적으로 MCC는 실제 현장에서 열반되어 설치되지만 시험적 여건을 고려하여 독립반

형태로 기초는 용접 고정으로 가정하여 제작하였다. 내부 장착 조건을 현장 여건과 최대한 유사하게 구현하여 전기부품들의 각 장착 위치에서의 증폭이 반영될 수 있는 시험체를 제작하였다. IEEE 344에 따라 3축 동시 가진에 의한 진동대시험을 수행하였으며 IEEE C37.98에 따라 전기부품에 대한 내진성능을 확인하였다⁽¹⁷⁾. 또한 가속도응답으로부터 NUREG/CR-5203의 증폭계수 산정 방법에 따른 MCC 캐비닛 모형의 동특성과 ICRS를 확인 및 검토하였다⁽¹⁸⁾.

2. 진동대시험 개요

2.1 시험체 구성

내진성능 확인을 위한 전기부품들은 국내 원전의 MCC 내부에 장착되는 회로 차단기(circuit breaker), 모터 회로 보호기(motor circuit protector), 제어용 변압기(control transformer), 캠 스위치(cam switch) 등으로 구성되었으며 Table 1에 상세를 나타내었다. 각 전기부품들은 Fig. 1과 같이 실제 MCC 내부에 장착되는 모듈인 버킷(bucket)에 장착된다. 이 연구에서는 3개의 버킷을 이용하여 MCC 캐비닛 모형의 각 층에 현장 설치 여건을 반영하여 전기부품을 장착할 수 있도록 하였다.

버킷이 장착되는 MCC 캐비닛 모형의 설계 및 제작을 위하여 유효성이 검증된 MCC 모형의 해석모델

Table 1 Specification of electrical components

No.	Type		Specifications	Quantity (EA)	Mounting location
S1	Circuit breaker		600 VAC, 250 VDC, 30 A	1	Bucket 1
S2	Motor circuit protector		600 VAC, 250 VDC, 30 A	1	Bucket 2
S3	Motor circuit protector		600 VAC, 250 VDC, 15 A	1	Bucket 3
S4	Control transformer		100 VA	1	
S5	Heater (thermal)		3.54 A ~ 13.00 A (overload protection current)	1	
S6	Switch board	Lamp	120 VAC	3	
		Cam switch	600 VAC, 250 VDC, 10 A	1	
S7	Cam switch		2NO, 2NC 220 VAC, 10 A	1	

을 활용하였다⁽¹⁹⁾. 현장조사 시 수행한 MCC의 충격 해머시험 결과 참조 및 원전 기기에 대한 기존 진동 대시험 결과를 활용하여 동특성을 반영하였다. 목표 고유진동수는 수평 방향에 대한 전역모드(global mode)를 18.20 Hz로 설정하였다. 현장 설치 여건을 반영한 장착 위치와 높이 및 전기부품과 버킷의 무게를 고려하고 각 층의 질량체(mass)를 적절히 조절하



Fig. 1 Bucket shape

여 해석모형을 작성하였다. 진동대에 체결되는 바닥 지그와 MCC 캐비닛 모형의 고정은 용접 연결로 가정하였다. 해석모형의 경계조건은 용접 연결되는 해당 위치를 모두 구속하여 정의하였다. 실험 시 조립·체결 등의 오차를 고려하여 해석모형의 고유진동수는 목표 고유진동수보다 일부 상향되도록 모델링하였다. 해석모형에 대한 고유진동수는 18.45 Hz로 모드 형상을 Fig. 2(a)에 나타내었으며 주요 모드에 대한 고유진동수 및 유효질량비를 Table 2에 나타내었다. 고유치해석 결과를 바탕으로 MCC 캐비닛 모형을 제작하였다. 각 전기부품이 장착된 버킷은 현장 설치 여건을 반영하여 Table 1과 같이 MCC 캐비닛 모형의 해당 층에 동일한 방식으로 용접 연결하여 시험체를 구성하였다. 진동대와 시험체의 바닥 지그는 M30 볼트를 이용하여 견고하게 고정하였으며 Fig. 2(b)에 진동대시험을 위한 설치 구성을 나타내었다. 시험체에 대한 공진주파수 및 응답 확인을 위하여 3축 가속도 센서(3743B1130G, PCB piezotronics)를 진동대와 시

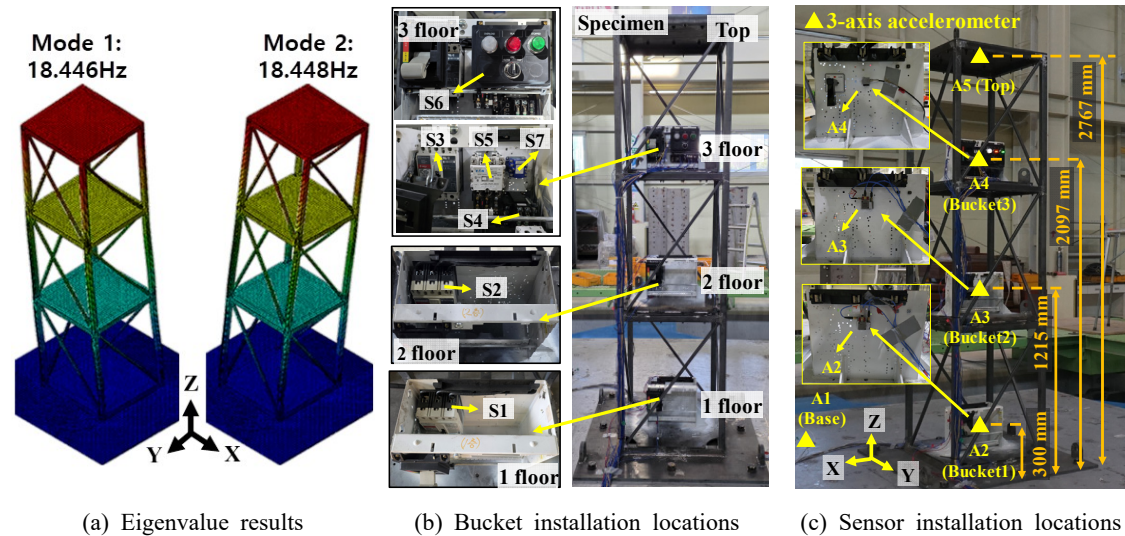


Fig. 2 Specimen fabrication and experimental setup based on eigenvalue analysis

Table 2 Effective mass ratios for the dominant modes

Mode no.	Frequency [Hz]	X	Y	Z	X rotation	Y rotation	Z rotation
1	18.446	0.01	0.81	0.00	0.96	0.01	0.26
2	18.448	0.81	0.01	0.00	0.01	0.96	0.38
3	40.264	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.21
4	54.647	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.06

험체의 최상단에 설치하였으며 Fig. 2(c)에 나타내었다. 또한 MCC 캐비닛 모형 내 각 층의 버킷에 전기 부품이 장착된 동일한 위치에 설치하여 전기부품 장착 위치에서의 ICRS를 확인하였다.

2.2 입력지진동

내진성능시험을 위한 운전기준지진(operating basis earthquake, OBE) 및 안전정지지진(safe shutdown earthquake, SSE)의 RRS는 각각 2 % 및 3 %의 감쇠 비로 작성되었다. 수평 및 수직 방향에 대한 RRS는 국내 원전의 FRS를 바탕으로 작성되었다. IEEE 323에 따라 실험 장비 및 측정의 불확실성에 대한 여유도 10 %를 추가 적용하였으며 작성된 RRS를 Fig. 3에 나타내었다. 수평 및 수직에 대한 영주기가속도(zero period acceleration, ZPA)는 OBE의 경우 각각 0.61 g, 0.51 g이며 SSE의 경우 각각 0.96 g, 0.85 g이다.

2.3 진동대시험 절차 및 방법

진동대시험은 부산대학교 지진방재연구센터의 6 자유도 진동대를 이용하여 IEEE 344에 따라 수행하였으며 시험에 대한 절차를 Fig. 4에 나타내었다. 내진성능시험 전 시험체에 대한 육안검사 및 전기부품의 기능 검사를 위한 on-off 작동 상태를 확인하였다. IEEE 344에서는 원전 내 장비에 대한 내진성능시험 시 SSE 수행 전 열화 적용을 위하여 최소 5회의 OBE를 수행하도록 요구하고 있다. 따라서 내진성능시험은 전기부품의 반복 진동에 의한 결함 및 피로 누적을 위한 OBE 5회를 수행한 이후 최종 기능 유지검증을 위한 SSE 1회를 수행하였다. 3축 동시 가진으로 수행하였으며 시험응답스펙트럼(test response

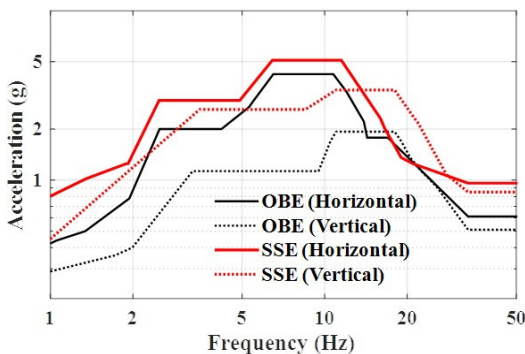


Fig. 3 RRS for seismic performance test

spectrum, TRS)에 대한 RRS의 포락 여부를 확인하며 진행하였다. 내진성능시험 전·후로 공진탐색시험을 수행하여 동특성 확인 및 손상 여부를 확인하였으며 육안검사 및 기능적 이상 여부 확인을 위한 on-off 상태에 따른 동작성을 확인하였다. 또한 내진성능시험 중 IEEE C37.98의 허용 기준인 chattering의 2 ms 초과 여부에 따른 전기적 연속성을 확인하였다.

3. 진동대시험 결과

3.1 공진탐색시험 결과

공진탐색시험은 RES로 표기하였으며 공진주파수의 결정은 입력된 가속도 응답에 대한 각 위치의 가속도 응답의 비로 산정하는 전달함수 방법을 이용하였다^(5,6). 내진성능시험 전 초기상태 및 내진성능시험 이후(OBE 5회, SSE 1회)의 RES 결과를 Table 3에 나타내었다. 공진주파수는 수평(X, Y) 방향 18.00 Hz,

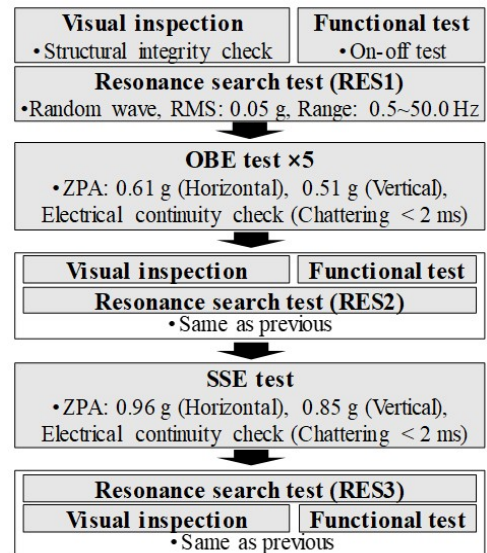


Fig. 4 Seismic performance test procedure

Table 3 Resonance search test results

Direction	Resonant frequency [Hz]		
	RES1 (initial state)	RES2 (after OBE×5)	RES3 (after SSE)
X	18.00	18.00	18.00
Y	18.00	18.00	18.00
Z	41.00	41.00	41.00

수직 방향 41.00 Hz로 확인하였다. 수평 방향에 대한 전역모드는 목표 고유진동수(18.20 Hz)와 1.1 % 오차를 나타내며 MCC 캐비닛 모형의 동특성이 잘 반영된 것으로 확인하였다. 초기상태와 OBE 5회 및 SSE 1회 수행 이후 3번 모두 RES 결과는 동일하였으며 내진성능시험 진행에 따른 구조적 손상은 없는 것으로 확인하였다. Fig. 5는 수평 방향의 각 위치에 대한 전달함수 산정 결과(RES3)를 나타내었다. 캐비닛의 높이에 따라 전달함수의 증폭률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 비교적 높이가 낮은 위치의 bucket 1에서의 응답(A2)의 경우 전달함수에 대한 증폭이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 캐비닛 모형 내 전기부품이 장착되는 높이 및 위치에 따라 공진 특성의 반영 또는 기여 정도가 다를 수 있음을 확인하였다.

3.2 내진성능시험 결과

전기부품의 내진성능 확인을 위하여 수행된 OBE 5회 및 SSE 1회에 대한 TRS는 RRS에 적절히 포락됨을 확인하였다. 전기부품 7종(S1 ~ S7) 모두 육안검

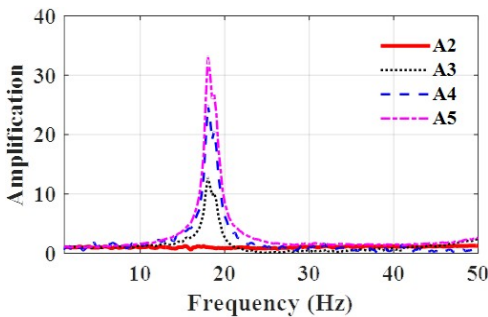
사 결과 구조적 이상이 없음을 확인하였다. 또한 내진성능시험 전·후 on-off 상태에 따른 동작성 및 내진성능시험 중 채터링의 발생 없이 전기적 연속성이 유지됨을 확인하였다. 이 연구에서 OBE 5회 수행으로 반복 지진에 의한 피로 및 열화 적용 이후 SSE의 수행을 통한 기능 유지 확인 결과 전기부품의 내진성능에는 이상이 없음을 확인하였다.

3.3 내부응답스펙트럼(ICRS) 검토

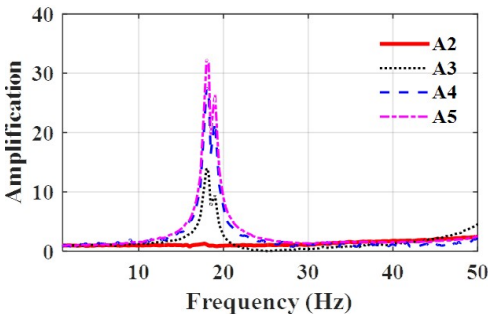
MCC 캐비닛 모형의 동특성과 ICRS의 확인 및 검토를 위하여 NUREG/CR-5203의 ZPA에 의한 증폭계수 산정 방법을 이용하였으며 이와 비교하였다. 여기서 ZPA는 RRS 범위 이상의 고주파수 영역의 최대 가속도 값이다⁽²⁰⁾. NUREG/CR-5203의 ZPA는 1/3 octave로 분석된 TRS에서 RRS의 주파수 범위를 고려하여 40 Hz 이상의 고주파수 영역의 영주기가속도 값으로 정의한다. 이 연구에서 ZPA는 1/12 octave로 분석된 TRS에서 RRS 및 진동대의 성능을 고려하여 45.25 Hz의 스펙트럼가속도 값으로 정의하였다⁽²¹⁾. 증폭계수는 식 (1)과 같이 진동대에 입력된 가속도응답(A1)으로 계산된 ZPA에 대하여 각 위치에서의 가속도응답(A2~A5)으로 계산된 ZPA의 비율로 산정되었다. 수평 방향(X, Y)에 대하여 산정된 ZPA 및 증폭계수 산정 결과를 Table 4에 나타내었으며 MCC 캐비닛 모형의 높이에 따른 증폭계수 결과를 NUREG/CR-5203에서 제시하는 ZPA에 의한 증폭계수와 함께 Fig. 6에 나타내었다.

$$AF_{iZPA} = A_{iZPA}(\text{Component}) / A_{1ZPA}(\text{Base}) \quad (1)$$

5회의 OBE에서 시험체 최상단(A5)의 증폭계수는 3.9 ~ 4.9의 범위로 나타났다. NUREG/CR-5203에서 ZPA에 의한 증폭계수의 최댓값(peak)인 4.8과 비교하여 Table 4 및 Fig. 6과 같이 대부분 작거나 거의 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 bucket 2(A3)의 증폭계수는 NUREG/CR-5203의 증폭계수보다 더 크며 특히 bucket 3(A4) 위치에서는 약 2배 ~ 3배 수준으로 더 큰 것을 확인할 수 있다. NUREG/CR-5203에서 제시한 증폭계수는 캐비닛 모형에 대한 응답(전역모드)과는 유사할 수 있으나 버킷 위치에 대한 응답인 ICRS(국부모드) 측면에서는 충분하지 않은 것으로 확인하였다. 또한 좌우(X) 방향보다 전후(Y) 방향에 대한 증폭계수가 대부분 더 크게 나타났다. 시



(a) X direction



(b) Y direction

Fig. 5 Transfer function results according to measurement location (RES3)

협체의 전기부품이 장착되는 버킷은 얇은 패널의 판 (plate) 구조이며 장착면을 기준으로 전후 방향이 면 외 방향임에 따른 더 큰 응답의 증폭임을 확인하였다. 증폭계수의 비교를 위하여 내진성능시험에 따른 결과를 Fig. 7에 나타냈으며 그 차이를 더 명확히 확인할 수 있다. 입력지진동의 수준이 더 큰 SSE가 OBE보다 증폭계수는 위치에 따라 25 % ~ 50 % 수준으로 더 작게 나타났다. 이는 캐비닛의 비선형적 거동 특성 때문이며 일반적으로 입력지진동이 일정 수준 이상으로 커질 경우 캐비닛 내부 조립, 체결, 접합 부 등에서의 마찰, 미끄러짐, 충돌 등에 의한 국부모

드의 발생과 함께 감쇠가 증가하며 증폭률이 감소할 수 있음을 확인하였다⁽¹⁷⁾. 특히 bucket 1(A2)의 위치에서는 OBE와 SSE의 증폭계수가 큰 차이 없이 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 공진 특성이 반영되지 않은 A2 위치에서는 OBE와 SSE의 증폭계수가 유사하지만 공진 특성이 반영되는 A3 ~ A5 위치에서는 SSE의 증폭계수가 비선형적 거동에 의해 OBE보다 감소될 수 있음을 확인하였다⁽¹³⁾. 따라서 캐비닛 내 전기부품은 장착되는 조건 및 위치에 대한 응답 및 증폭을 고려하여 설치하는 것이 매우 중요한 것으로 판단하였다.

Table 4 ZPA and associated amplification factor results

Test ID	Direction	ZPA (spectral acceleration at 45.25 Hz in TRS) [g]					Amplification factor [g/g]			
		A1 _{ZPA} (base)	A2 _{ZPA} (bucket 1)	A3 _{ZPA} (bucket 2)	A4 _{ZPA} (bucket 3)	A5 _{ZPA} (top)	AF2 _{ZPA} (bucket 1)	AF3 _{ZPA} (bucket 2)	AF4 _{ZPA} (bucket 3)	AF5 _{ZPA} (top)
OBE1	X	0.882	1.088	5.396	8.200	3.734	1.233	6.117	9.295	4.233
	Y	0.812	1.211	6.058	10.190	3.436	1.491	7.461	12.548	4.231
OBE2	X	1.054	1.125	5.887	10.417	5.129	1.068	5.587	9.887	4.868
	Y	0.875	1.266	4.646	11.617	3.562	1.447	5.309	13.273	4.069
OBE3	X	0.937	1.543	5.922	10.724	3.806	1.647	6.319	11.444	4.061
	Y	0.860	1.510	5.039	9.427	3.570	1.755	5.857	10.957	4.149
OBE4	X	0.999	1.159	5.258	8.225	4.348	1.161	5.264	8.233	4.352
	Y	0.928	1.307	4.968	10.362	3.648	1.408	5.352	11.162	3.929
OBE5	X	0.949	1.223	5.872	9.011	4.421	1.288	6.185	9.492	4.657
	Y	0.917	1.473	4.318	11.625	3.708	1.607	4.709	12.678	4.044
SSE	X	1.507	2.211	6.989	7.459	3.582	1.467	4.637	4.949	2.377
	Y	1.559	2.824	5.339	9.314	3.700	1.811	3.424	5.973	2.373

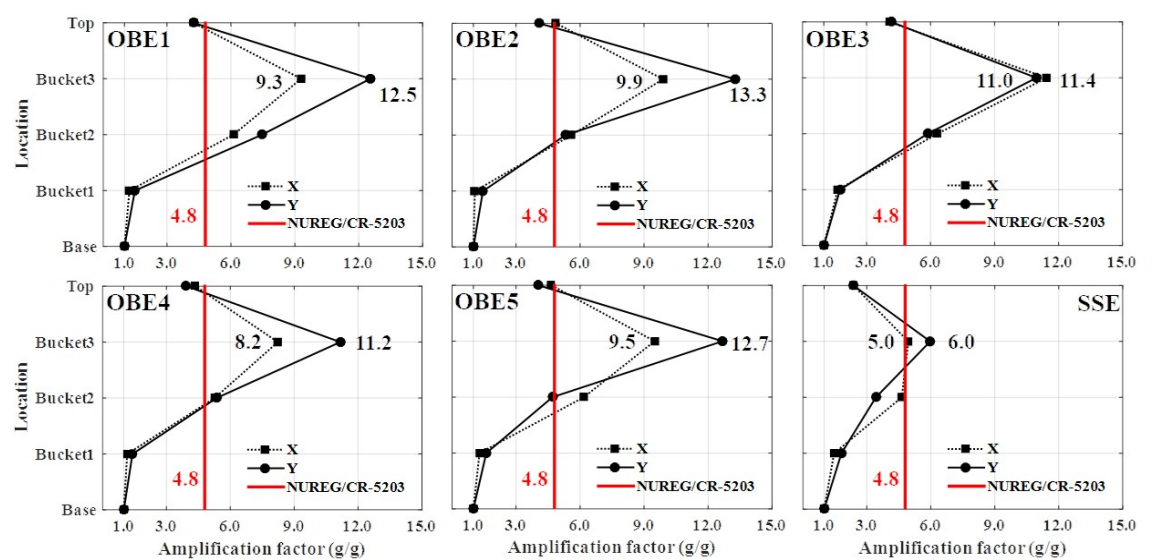


Fig. 6 Amplification factors along the specimen locations

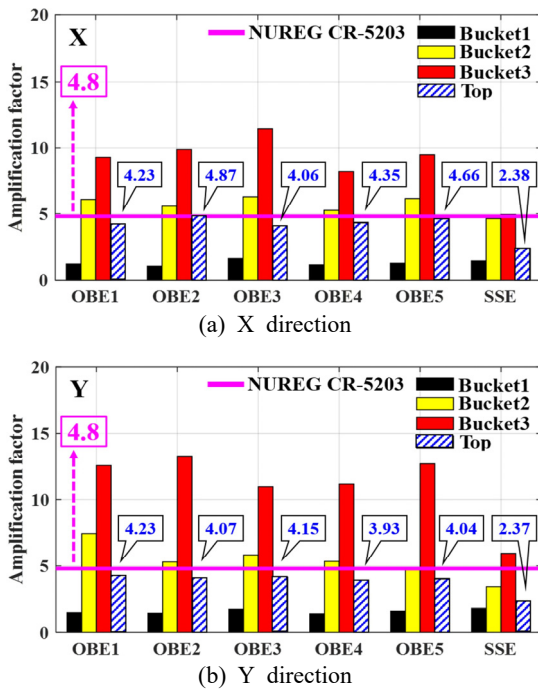


Fig. 7 Comparison of amplification factors by seismic performance test

4. 결 론

이 연구에서는 국내 원전에서 사용되는 여러 전기부품을 대상으로 내진성능시험을 수행하였다. 전기부품이 장착되는 MCC의 동특성과 장착 조건 및 위치 등 현장 여건과 동일하게 구현함으로써 적절한 ICRS를 반영한 내진성능을 확인하고자 하였다. IEEE 344 및 IEEE C37.98에 따른 전기부품에 대한 진동대시험을 수행하고 내진성능을 확인하였으며 NUREG/CR-5203에 기반한 방법으로 MCC 캐비닛 모형의 동특성과 ICRS를 확인 및 검토하였다.

국내 원전에 대한 FRS로부터 작성된 RRS를 적용하고 MCC 설비의 동특성 반영 및 장착조건을 모사하여 내진성능시험을 수행한 결과 전기부품의 동작성 및 전기적 연속성 등의 기능에는 이상이 없음을 확인하였다.

NUREG/CR-5203에서 제시한 증폭계수는 전기부품이 장착되는 캐비닛 설비 외함의 응답(전역모드)에서는 보수적이거나 유사한 수준이지만 캐비닛 내부의 응답인 ICRS(국부모드)에서는 과소 평가될 수 있음을 확인하였으며 캐비닛 설비 내 위치에 따른 적절한 반영이 필요할 것으로 판단하였다. 또한 캐비닛 내

전기부품이 장착되는 버킷(모듈)의 높이 또는 위치에 따라 공진 특성의 반영 또는 기여 정도가 매우 다를 수 있다. 이에 따라 입력지진동의 수준이 커지면 응답의 증폭은 오히려 감소하는 등 비선형적 거동에 의한 ICRS가 크게 달라지는 것을 확인하였으며 이에 대한 정량적 평가를 위한 추가적인 연구가 추후 필요할 것으로 판단하였다. 단, 이 연구에서 제작된 시험체를 바탕으로 한 결과이며 캐비닛의 열반 조건 및 기초 고정 방법 또는 도어 패널의 충격, 실제 전기부품이 장착되는 모듈의 형태 및 연결 방법 등에 따라 캐비닛 내부 응답의 경향은 달라질 수 있다.

따라서 원전 내 캐비닛 설비에 장착되는 전기부품은 발생하는 지진의 특성, 캐비닛 내 장착되는 위치, 형태 및 조건 등을 적절히 고려하여 선정 및 적용해야 할 것으로 판단하였다. 이 연구의 결과는 원전 전기부품의 내진성능, 캐비닛 내 설치 조건 등에 관한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20224B10200080).

References

- (1) Korea Atomic Energy Research Institute, 2004, Analysis of Component Reliability of Korean Standard Nuclear Power Plants, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2749, Daejeon, Korea.
- (2) The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2004, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE, IEEE Std 323-2003, NY, United States.
- (3) The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013, IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE, IEEE Std 344-2013, NY, United States.
- (4) Jeong, Y. S., Chang, S. J., Kim, S. W., Park, J. and Park, D. U., 2023, Fragility Comparison of Battery Chargers for Nuclear Power Plants Depending on Reinforcement of Supporting for Massive Components,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 264~272.

(5) Jeong, Y. S., Eem, S., Jeon, B. 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.

(6) Chang, S. J., Jeong, Y. S., Jeon, B. G. and Park, D.-U., 2023, Behavioral Characteristics Analysis for Earthquakes of the Similar Performance Equipment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 193~202.

(7) Kim, S. J., 2019, Seismic Performance Evaluation of the Li-polymer Battery Rack System for Nuclear Power Plant, Journal of Korea Academia-industrial Cooperation Society, Vol. 20, No. 5, pp. 13~19.

(8) Lin, W. T., Wu, Y. C. and Huang, C. C., 2014, Frequency Analysis of the Motor Control Centers in a Nuclear Power Plant Using Testing and Simulating Methods, Applied Mechanics and Materials, Vol. 479~480, pp. 1045~1050.

(9) Jeon, B. G., Chang, S. J., Park, D. U., Kim, S. W. and Yun, D. W., 2024, Limit State Seismic Performance of Safety Related Electrical Cabinet for Nuclear Power Plants, Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 15, No. 5, pp. 34~42.

(10) Park, D. U., Chang, S. J., Jeon, B. G., Kim, M. and Park, J., 2026, Relationship Between Input Acceleration and Chattering Duration of Protective Relay for Nuclear Power Plant Equipment, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 58, No. 9, 104402.

(11) Chang, S. J., Jeon, B. G., Park, D. U. and Kim, S. W., 2024, Shaking Table Test to Verify the Seismic Performance of Nuclear Electric Components, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 28, No. 3, pp. 141~147.

(12) Tseng, Y. D., Chang, W. F. and Gau, Y. C., 2015, A Relay Fragility Test Experience of Nuclear Power Plant in Taiwan, Proceedings of the 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-23), pp. 4170~4178.

(13) Kim, M. K., Choi, I. K. and Seo, J. M., 2012,

A Shaking Table Test for an Evaluation of Seismic Behavior of 480 V MCC, Nuclear Engineering and Design, Vol. 243, pp. 341~355.

(14) Kennedy, R. P., 1989, Effective Amplification Factors for Motor Control Centers and Switchgear, Letter Report to P. Y. Chen, U.S. Nuclear Regulatory Commission, MD, United States.

(15) Merz, K. L. and Ibanez, P., 1990, Guidelines for Estimation of Cabinet Dynamic Amplification, Nuclear Engineering and Design, Vol. 123, No. 2~3, pp. 247~255.

(16) Reed, J. W., Kennedy, R. P., Buttemer, D. R., Idriss, I. M., Moore, D. P. et al., 1991, A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), Electric Power Research Institute, EPRI NP-6041-SL, CA, United States.

(17) The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013, IEEE Standard for Seismic Qualification Testing of Protective Relays and Auxiliaries for Nuclear Facilities, IEEE, IEEE Std C37.98-2013, NY, United States.

(18) Bandyopadhyay, K. K., Hofmayer, C. H., Kassir, M. K. and Pepper, S. E., 1988, Dynamic Amplification of Electrical Cabinets, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5203, DC, United States.

(19) Yun, D. W., Jeon, B. G., Kim, S. W., Hahm, D. G. and Lee, H. P., 2024, Seismic Behavior Characteristics Analysis of a Cabinet Model via Experimental and Numerical Studies, Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 15, No. 4, pp. 24~31.

(20) The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, IEEE, IEEE Std 693-2018, NY, United States.

(21) Yun, D. W., Jeon, B. G., Kim, S. W., So, G. and Lee, S. J., 2023, Shake Table Test for Seismic Behavior Characteristics Analysis of an Electrical Cabinet Model Considering Cracks in the Anchor Foundation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 296~305.