

마찰진자시스템이 적용된 전기캐비닛의 3축 진동대 시험에 의한 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation via Triaxial Shaking Table Test for an Electrical Cabinet with Friction Pendulum System

전 법 규* · 김 성 완* · 윤 다 운* · 주 부 석** · 정 우 영†

Bub-Gyu Jeon*, Sung-Wan Kim*, Da-Woon Yun*, Bu-Suk Ju** and Woo-Yong Jung†

(Received February 23, 2021 ; Revised March 30, 2021 ; Accepted March 30, 2021)

Key Words : Friction Pandulum System(마찰진자 시스템), Seismic Performance Evaluation(내진성능 평가), Shaking Table Test(진동대 시험), Vibration Characteristics(진동특성)

ABSTRACT

In recent years, earthquakes have caused more damage to non-structural components than to structures. Among the non-structural components, the electrical panel is one of the important devices used to maintain the functions of the facility. Therefore, it is very important to protect the electrical cabinet from earthquakes. Seismic performance can be improved while minimizing design changes by applying a seismic isolation system. FPS (friction pendulum system) is an isolation system that is capable of isolating structures from earthquakes by using the properties of a pendulum. The natural frequencies of the structures can be determined by designing the radius of curvature of the FPS. In this study, the seismic performance of an FPS with an overturn prevention device was evaluated through a 3-axis shaking table test. The seismic isolator was installed on an RTU panel used in hydroelectric power plants.

1. 서 론

세계적으로 규모 5 이상 지진의 발생 빈도는 매년 증가하고 있다. 한반도 또한 지진관측을 시작한 이후 지진의 발생추이는 꾸준히 증가하고 있다. 2019년 까지 규모 4 이상의 지진이 50회 이상 발생하였으며 규모 5 이상의 지진은 10회 이상 발생하였다. 따라서 지진에 의한 사회적, 경제적 손실을 줄이기 위한 내진

설계의 필요성이 강조되기 시작하였다.

최근 국내의 지진피해사례에서 다수의 지진피해가 비구조요소의 손상에 의해 발생하였다. 이와 같이 구조물의 내진설계가 충분하더라도 주요기능을 담당하는 기기·설비에 피해가 발생할 수 있다. 한반도와 같은 중진 지역에서는 지진피해의 양상이 비구조요소에 집중될 가능성이 있으며, 실제로 2016년 경주지진과 2017년 포항지진을 통해 전기기기, 배관설비 등의 다양한 비구조요소의 피해가 보고된 바 있다^{(1,2)}}.

† Corresponding Author; Gangneung-Wonju National University, Professor

E-mail : woojung@gwnu.ac.kr

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

** Kyung Hee University, Professor

‡ Recommended by Editor Jung Woo Sohn

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

대표적인 기계·전기 비구조요소인 전기캐비닛은 일반적으로 시설물 고유의 기능을 유지하기 위하여 제어와 통신 등의 역할을 담당한다. 따라서 전기캐비닛의 손상은 시설의 기능장애를 유발할 수 있다. 특히 발전플랜트, 송변전설비와 같은 사회기반 시설의 피해는 사회전반적인 막대한 손실을 동반하기 때문에 반드시 안전성이 확보되어야 한다. 따라서 주요 기능을 담당하는 전기캐비닛의 지진거동특성을 분석하고 내진성능 평가하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다⁽³⁻⁶⁾. 캐비닛을 구성하는 주요 부품의 독립적인 내진성능평가를 위하여 캐비닛의 내부 응답을 추정하기 위한 연구가 수행되었으며^(7,8), 캐비닛의 로킹과 들림에 의해 발생하는 충격하중과 증폭되는 응답특성을 분석하기 위한 연구도 진행되었다^(9,10). 선행 연구의 결과로부터 전기캐비닛은 지진하중에 의해 잠금장치의 파손, 지지부의 손상, 구성품의 탈락 등의 구조적인 손상이 발생할 수 있으며 부품의 떨림과 문의 쿵광거림, 로킹과 들림에 의한 충격하중에 의해 내부 응답가속도가 크게 증가하는 것이 확인되었다.

지진 발생이 잦은 일본의 경우 과거에 적용하던 구조물 보강에 의한 내진설계보다는 면진과 제진 기술을 적극적으로 적용하려는 추세이다. 천연고무베어링(natural rubber bearing, NRB), 고감쇠고무베어링(high damping rubber bearing, HDRB) 그리고 마찰진자시스템(friction pendulum system, FPS) 등의 면진장치가 일반적으로 사용되며, 구조물 하부와 기초의 경계지점에 설치되어 지진하중의 영향을 감소시키는 역할을 한다⁽¹¹⁾. 면진장치는 1980년대 초부터 건축 구조물, 교량 등의 다양한 사회기반 시설물에서 주로 적용되어왔으며, 효과적인 지진력 저감 성능이 입증되어 현재까지 확실한 지진대응 시스템 중 하나로 인식되어왔다⁽¹²⁾. 최근 복잡한 설계변경 없이 지진동과 충격으로부터 전기캐비닛을 안전하게 보호하기 위하여 캐비닛의 하부에 면진 장치를 적용하기 위한 노력이 진행되고 있다.

원자력 분야에서는 면진장치를 적용한 비상디젤발전기의 지진취약도를 분석하기 위한 연구와⁽¹³⁾ 면진장치의 종류에 따른 지진거동 특성을 평가하기 위한 시험적 연구가 수행된 바 있다^(14,15). 마찰진자시스템의 경우 기기설비에 적용하기 위하여 진동대 시험으로 진동저감 특성의 분석이 수행되기도 하였다^(16,17). 그러나 대부분의 연구는 면진장치의 축소모형을 사용하여

현장 설치조건에 모사가 부족하거나, 강재를 이용하여 기기의 하중을 모사하여 캐비닛의 높고 비대칭적인 무게중심과 구성품의 로컬모드 등을 적절히 표현하지 못하는 실정이다. 또한 대부분의 진동대 시험을 이용한 면진장치의 성능평가는 수평 양방향에 대해 수행된다. 수평 양방향과 수직방향의 하중 조합을 고려하여 3축 동시진동에 의한 진동대 시험으로 면진장치의 3차원 거동 특성과 진동 저감 성능을 분석한 사례는 제한적이며 국내에서는 관련 연구결과를 찾기 어려운 실정이다. 따라서 이 논문에서는 실규모 3축 진동대 시험에 의하여 전기캐비닛에 적용하는 마찰진자 시스템의 진동저감 성능을 확인하고자 하였다.

건축물 내진설계기준⁽¹⁸⁾에서 지진 발생 이후에 그 기능이 반드시 유지되어야 하는 주요 비구조요소는 진동대 시험을 통하여 내진성능을 증명할 것을 규정하고 있다. ASCE 7에서는 비구조 요소는 지진하중 및 상대변위 요구사항을 만족시켜야 하며, 기능적 전기적 결함이 발생하지 않아야 할 것을 명시하고 있다. 이러한 비구조요소에 대하여 지진에 대한 요구성능의 만족 여부는 ICC-ES AC 156등의 실험방법으로 검증할 수 있다⁽¹⁹⁾. 따라서 이 논문에서는 ICC-ES AC 156의 실험방법을 참조하여 3축 진동대 시험을 수행하였다.

형상계수가 너무 작은 고무베어링의 사용은 올바른 전단변형을 저해하고 휨변형에 의한 거동을 유발시킬 가능성이 있다. 그러나 마찰진자시스템의 경우, 주파수 영역에 크게 영향 받지 않고 전 영역에서 고른 지진력 저감효과를 가진다⁽¹⁴⁾. 하지만 마찰진자 시스템은 설계초과지진에 의해 볼의 이탈 또는 전도의 위험이 있다. 따라서 이 연구에서는 전도 방지를 위한 스토퍼와 추가 복원력 확보와 상부구조의 이탈방지를 목적으로 하는 스프링이 적용된 볼트랜스퍼형 마찰진자시스템인 부전도 면진장치를 전기캐비닛의 한 종류인 RTU패널의 하부에 설치하여 3축 진동대 시험을 수행하였으며, RTU패널의 주요 위치에서의 응답신호를 측정하고 분석하였다.

2. 시험대상 및 설치조건

이 연구에서 사용한 전기 캐비닛은 RTU(remote terminal unit)패널이다. RTU는 원격지에서 데이터를 수집해 전송 가능한 형식으로 데이터를 변환한 뒤 상위

대상 시스템으로 송신하며, 또한 데이터를 수신하여 지시되는 일련의 작업 절차들을 수행하는 장치로서 발전 시설의 제어를 위하여 사용되는 중요한 설비이다. 시험 결과의 신뢰성을 향상시키기 위하여 수력발전소 현장에서 사용하였던 2기가 연결된 RTU패널을 시험대상으로 하였다. RTU패널의 하부에 면진장치를 설치하였으며, 수평 2방향과 수직 1방향을 고려한 3축 진동대 시험을 수행하였다. Table 1은 시험대상인 RTU패널과 면진장치의 상세이다. 여기서 RTU패널은 열반된 두 캐비닛의 무게를 표시하였으며, 면진장치의 무게는 진동대 고정을 위한 지그를 포함한 것이다.

기기적용을 위해 개발된 기존의 마찰진자시스템은 상하진동에 의해 유격이 발생하여 들림에 의한 충격, 볼의 이탈 및 상부구조물의 전도가 발생할 우려가 있다. 시험에서 사용한 면진장치는 (주)파워엔텍에서 개발한

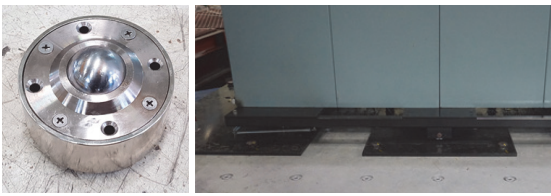
부전도 면진장치이다. 이 면진장치는 마찰진자시스템의 한 종류로써 Fig. 1(a)와 같은 볼트랜스퍼(ball transfer)를 사용하여 볼의 이탈을 방지하고, Fig. 1(b)와 같이 면진장치의 상판과 하판을 연결하는 스프링을 설치하여 수평방향의 복원력과 함께 수직방향의 구속력을 제한적으로 확보하였다. 그리고 상부구조의 이탈과 전도를 방지하기 위한 스톱퍼가 설치되었다. Fig. 1(c)는 부전도 면진장치의 평면도이고 Fig. 2는 진동대에 설치된 RTU패널의 사진이다. 진동대 시험은 부산대학교 지진방재연구센터의 6자유도 진동대를 이용하여 수행되었다.

3. 입력지진동

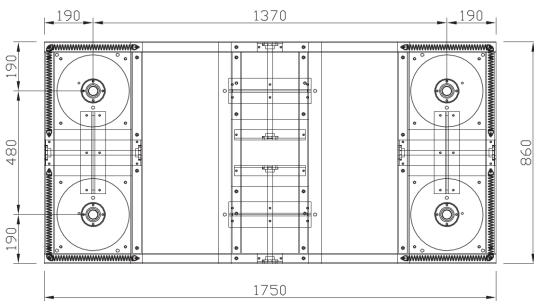
이 논문에서는 전기캐비닛이 일반 건축물에 설치되는 경우와 산업시설에 설치되는 경우를 모두 고려하기 위하여 건축물 내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항⁽²⁰⁾을 참조하였으며, ICC-ES AC 156에서 제시한 방법에 의해 요구응답스펙트럼(required response spectrum)을 작성하였다. 건축물 내진설계기준에 따라 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})를 계산하면 식 (1)과 같다. 여기서 S 는 유효지반가속도이며 F_a 는 단주기 지반증폭계수이다. 식 (2)의 S 는 지진구역 I 의 지진구역계수(Z)에 2400년 재현주기에 해당하는 위험도계수(I) 2.0을 곱한 값인 0.22를 적용하였다. F_a 는 1.5로 가정하였으며 계산된 S_{DS} 는 0.55이다.

Table 1 Description of UUT(unit under test)

Name	Model (detail)	Specification [mm]			Weight [kg]
		L	W	H	
RTU panel	RTU No.2-1	880	620	2350	518
	RTU No.3-1	880	620	2350	
Isolation system	Non-overtum seismic isolator	1750	860	110	373



(a) Ball transfer (b) Spring



(c) Drawing of non-overtum seismic isolator

Fig. 1 Non-overtum seismic isolator



Fig. 2 RTU panel with non-overtum seismic isolator on the shaking table

내진설계기준 공통적용사항과 건축물 내진설계 기준의 유효지반 가속도(S)의 계산방법은 동일하다. 그러나 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})는 구분된다. 식 (3)은 내진설계기준 공통적용사항의 단주기 설계스펙트럼 가속도의 계산식이다. 식 (2)와 식 (3)에서 내진설계기준 공통적용사항의 단주기 설계스펙트럼 가속도가 건축구조기준의 경우보다 1/3배 더 크게 계산됨을 알 수 있다. 단주기 지반증폭계수가 1.5이고 유효지반가속도가 0.22일 때 건축물 내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항의 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})는 각각 0.55와 0.825이다. 이 연구에서는 S_{DS} 가 0.55인 경우를 100% (EQ1) 가속도 배율로 정의하고 S_{DS} 가 0.825인 경우를 150% (EQ2)로 정의하였다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \tag{1}$$

$$S = Z \times I \tag{2}$$

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \tag{3}$$

구조물의 응답을 고려한 ICC-ES AC 156의 요구응답스펙트럼은 Fig. 3과 같으며 요구응답스펙트럼을 작성하기 위한 변수는 Table 2와 같다. 전기캐비닛과 같은 기기설비는 구조물의 모든 층에 설치될 수 있으

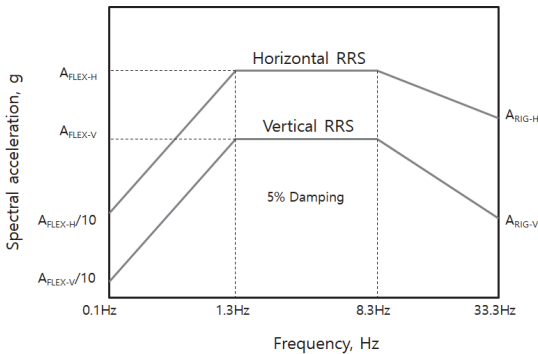


Fig. 3 Response spectrum of ICC ES AC 156

므로 가장 엄격한 조건인 최상층 설치를 고려하여 구조물과 설치 위치의 비(z/h)를 1로 가정하였다. 요구응답스펙트럼의 감쇠비는 5%이다. 수평방향의 스펙트럼 가속도를 결정하기 위한 식은 식 (4), 식 (5)와 같다. 식 (6)과 식 (7)은 수직방향의 스펙트럼가속도 결정을 위한 식이다. A_{RIG-H} 는 수평방향 ZPA (zero period acceleration)이고, A_{RIG-V} 는 수직방향의 ZPA이다. ICC-ES AC156에 따라 A_{FLX-H} 는 S_{DS} 의 1.6배를 초과하지 않도록 하였다. 가속도 시간이력은 ASCE 4-98을 참조하여 사다리꼴 포락함수(envelope function)를 적용하였으며 각 축 방향(X, Y, Z)의 상관관계를 검토하였다. 서로 다른 두 방향(XY, XZ, YZ)의 상관관계는 ASCE 4-98⁽²¹⁾과 IEEE Std. 344⁽²²⁾를 참조하여 상관계수함수(correlation function) 값이 0.3 이하가 되도록 하였다. 작성된 가속도 시간이력의 진동 지속시간은 30초이고, 강진 지속시간은 20초이다. 5초 동안 가속도 크기가 상승하여 20초간 강진이 지속된 후 5초 동안 가속도의 크기가 줄어든다.

$$A_{FLX-H} = S_{DS} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \tag{4}$$

$$A_{RIG-H} = 0.4 S_{DS} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \tag{5}$$

$$A_{FLX-V} = 0.67 \times S_{DS} \tag{6}$$

$$A_{RIG-V} = 0.27 \times S_{DS} \tag{7}$$

4. 계측 계획 및 시험 방법

4.1 계측계획

RTU패널 프레임의 상부, 중앙부, 하부와 내부 주요 부품인 파워서플라이(power supply)와 릴레이(relay) 주변에 3축 가속도계(A2~A6)를 설치하여 가속도 응답을 계측하였으며, 신뢰성 있는 시험응답을 획득하기 위하여 진동대 바닥에 1개의 3축 가속도계(A1)를 설치하

Table 2 Seismic parameters for artificial earthquake

Name	Code	S_{DS} [g]	z/h	A_{FLX-H} [g]	A_{RIG-H} [g]	A_{FLX-V} [g]	A_{RIG-V} [g]
EQ1	KDS	0.55	1	0.88	0.66	0.36	0.14
EQ2	Common application of seismic design criteria	0.825	1	1.32	0.99	0.55	0.22

었다. RTU패널과 부전도 먼진장치를 연결하는 볼트 주변 바닥판의 두께는 2 mm 수준으로 과도한 외력에 의해 국부적인 변형이 발생할 우려가 있다. 따라서 볼트 중심에서 20 mm 떨어진 위치에 직교하는 수평방향으로 strain gage를 설치하였다(SG1 ~ SG8). Strain gage는 Fig. 4와 같이 전면 4개의 연결 볼트 주변에 설치하였다. 또한 RTU패널의 지진하중에 의한 상대변위 확인을 위하여 상부와 하부에 변위계를 설치하였다. Sampling rate는 512 Hz이고 계측기의 설치위치는 Fig. 4와 같다.

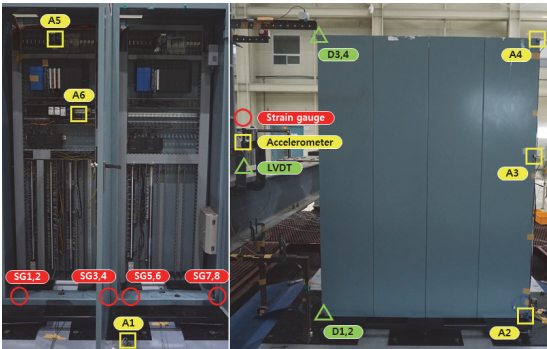


Fig. 4 Sensor location

Table 3 Test procedure and method

No.	Test name	Test method
1		Visual inspection
2	Function verification	On-off-on test
3	Resonant frequency search	Low-level amplitude(0.05 g) single-axis sinusoidal sweep (0.5 ~ 50.0) Hz, 2 octave/min. X, Y, Z axis independently
4	Seismic simulation EQ1	Time duration 30 s, strong motion 20 s, 0.5 Hz ~ 50 Hz damping ration 5 %, triaxial test
5		Visual inspection
6	Function verification	On-off-on test
7	Seismic simulation EQ2	Time duration 30 s, strong motion 20 s, 0.5 Hz ~ 50 Hz damping ration 5 %, triaxial test
8	Function verification	On-off-on test
9		Visual inspection

4.2 시험방법

시험의 절차는 ICC-ES AC 156을 참조하여 Table 3과 같이 수행하였다. 모든 시험의 전과 후에 전원을 on-off-on 하여 회로의 건전성을 점검하였으며 육안 점검을 통하여 부품의 탈락, 변형 등을 확인하였다.

시험 전 시험대상의 공진주파수를 확인하기 위하여 구조물에 손상을 미치지 않도록 낮은 수준의 가속도 입력(0.05 g)으로 단방향 주파수 소인 시험(single-axis sinusoidal sweep)을 각 방향에 대해 수행하였다. 지진 모사시험(seismic simulation test)은 두 개의 수평축(전후, 좌우)과 하나의 수직축(상하)에서 동시에 가진되는 동적 시험으로서, 진동대 바닥에서 계측된 가속도 응답의 TRS(test response spectrum)가 RRS(required response spectrum)를 포락하도록 수행하였다.

5. 시험 결과

5.1 공진주파수

시험대상의 공진주파수는 진동대에서 계측된 가속도(base, *a*)에 대한 실험대상의 각 위치에서 응답가속도(Unit, *b*)의 전달함수를 계산하여 결정하였다. 전달함수(T_{ab})는 식 (8)과 같이 입력된 신호의 power spectral density(P_{aa})에 대한 입, 출력신호의 Cross power spectral density(P_{ba})로 계산한다.

$$T_{ab}(f) = \frac{P_{ba}(f)}{P_{aa}(f)} \tag{8}$$

공진주파수 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 신호는 symmetric hamming window가 적용되었다. Table 4와 같이 부전도 먼진장치가 적용된 RTU 패널의 수평방향 공진주파수는 1.125 Hz이고 상하방향 공진주파수는 21.88 Hz이다. 먼진장치의 공진주파수가 지배적으로 작용하여 내부 기기의 위치에서의 가장 낮은 공진주파수는 동일하게 계측되었다.

5.2 변형률 응답 및 상대변위

Fig. 5는 시험 중 계측된 가장 큰 변형률 응답의 시간이력이다. EQ1에서 최대변형률은 0.0002이며 EQ2의 최대변형률은 0.0008이다. Fig. 5(b)와 같이 EQ2에서 계측된 충격신호는 SG2 ~ SG7의 동일한 시간에 유사한 크기로 계측되었다. 이는 마찰진자시스템의 허

용변위의 한계로 인해 볼과 마찰접시의 가장자리 또는 스토퍼의 충돌로 발생하는 충격으로 판단된다. 모든 시험에서 누적손상에 의한 영구변형은 발견되지 않았다.

Fig. 6은 RTU패널 상단과 하단의 상대변위 시간이력이고 Table 5는 최대 상대변위를 정리한 것이다. 좌우방향과 비교하여 전후방향의 최대 상대변위가 크게 측정되었다. EQ1에서 측정된 최대 상대변위는 좌우방향(X)으로 3 mm, 전후방향(Y)으로 7 mm로 RTU패널 높이의 0.13 %와 0.3 % 수준이다. EQ2의 경우 좌우와 전후방향의 최대 상대변위는 각각 5 mm와 26 mm로 각각 RTU패널의 높이와 비교하여 0.21 %와 1.11 % 수준이다. Telcordia GR-63 core R4-69⁽²³⁾와 방송통신설비의 내진 시험방법⁽²⁴⁾에서 제시하고 있는 시험대상의 상단 단방향 최대 허용 변위는 75 mm로 EQ2의 최대 상대변위는 시험기준의 35 % 수준이다. 따라서 부전도 면진장치에 의해 RTU패널은 잘 보호된 것으로 판단된다.

5.3 가속도 응답

Fig. 7은 시험 중 측정된 최대가속도 응답이다. EQ2는 EQ1과 비교하여 요구응답스펙트럼의 수평방향 ZPA인 A_{RIG-H} 가 150 %, 수직방향의 ZPA인 A_{RIG-V} 가 157 % 수준이다. Fig. 7에서 EQ1은 EQ2와 비교하여 가속도 증폭을 상당히 잘 억제하고 있는 것을 확인할 수 있다. EQ2 또한 입력지진동보다

Table 4 Results of resonance frequency search tests

Sensor location	Direction	Lowest resonance frequency [Hz]
A4 (cabinet top)	Side to side (X)	1.125
	Front to back (Y)	1.125
	Vertical (Z)	21.88
A5 (power supply)	Side to side (X)	1.125
	Front to back (Y)	1.125
	Vertical (Z)	11.25
A6 (relay)	Side to side (X)	1.125
	Front to back (Y)	1.125
	Vertical (Z)	21.88

RTU패널에서 측정된 최대가속도 응답은 크지 않다. EQ1의 경우 가장 큰 가속도 응답이 측정된 위치는

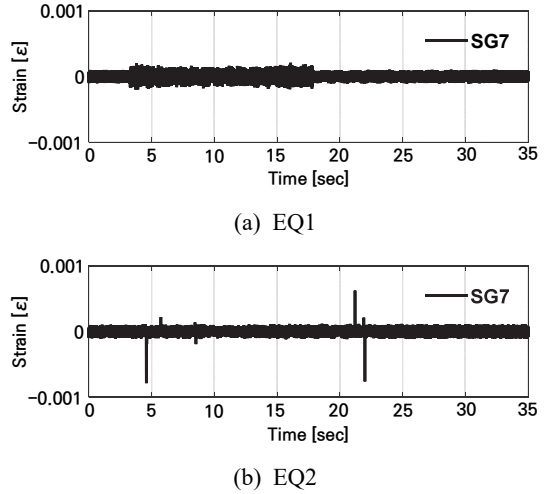


Fig. 5 Strain responses

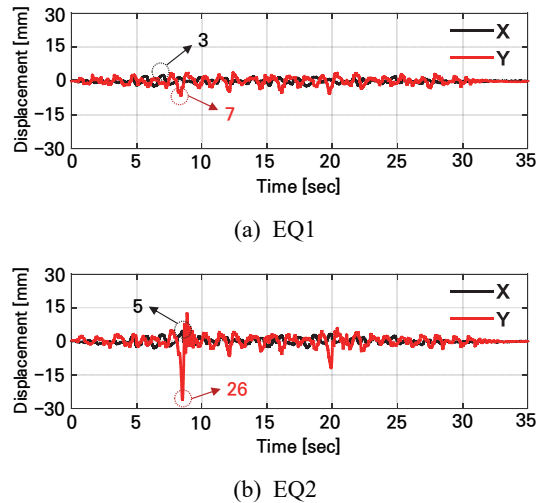


Fig. 6 Relative displacement responses between cabinet top and bottom

Table 5 Maximum relative displacement

Input motion	Max. relative disp. (mm)		Allowable criteria (mm)
	X	Y	
EQ1	3	7	75
EQ2	5	26	

power supply이고 EQ2의 경우 RTU패널의 중앙과 상단에서 가장 큰 최대가속도 응답이 측정되었다. EQ2에서 내부 기기인 power supply와 relay에서 측정된 최대가속도 값은 RTU패널의 최대가속도 값보다 작다.

지진입력하중에 대한 RTU패널의 시험 응답 스펙트럼 가속도 증폭비 $fa(i)$ 를 식 (9)와 같이 계산하였다²⁵⁾.

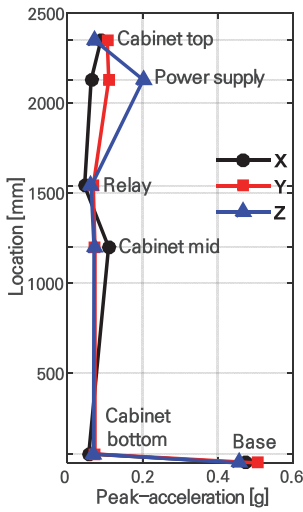
$$fa(i) = \frac{Sa(\text{Component})}{Sa(\text{Ground})} \tag{9}$$

여기서 $Sa(\text{ground})$ 는 진동대에서 측정된 가속도 응답의

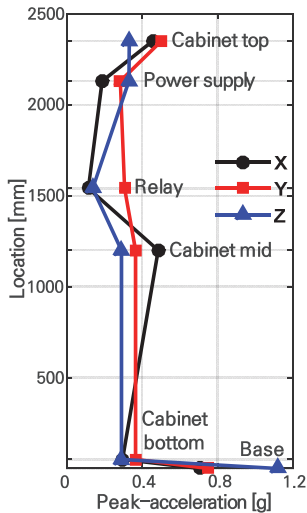
TRS(test response spectrum)이며, $Sa(\text{component})$ 는 RTU패널에 부착된 가속도계에서 측정된 TRS이다. TRS는 1/12 옥타브로 분석되었다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 EQ1과 EQ2의 $fa(i)$ 이다. Fig. 8에서 power supply의 상하방향 응답을 제외하고 모두 1 이하이다. EQ2의 경우 20 Hz보다 큰 주파수 영역에서 $fa(i)$ 가 증가하지만 모두 1보다 작다. 비교적 무거운 부품인 power supply는 캔틸레버 형식으로 판넬에 고정되어 상하방향의 공진주파수인 11.25 Hz에서 $fa(i)$ 가 크게 나타난 것으로 판단된다.

6. 가속도 저감 성능 분석

3층 진동대 시험에 의한 부전도 면진장치의 진동 저감 성능을 분석하기 위하여 진동대 바닥과 RTU패널의

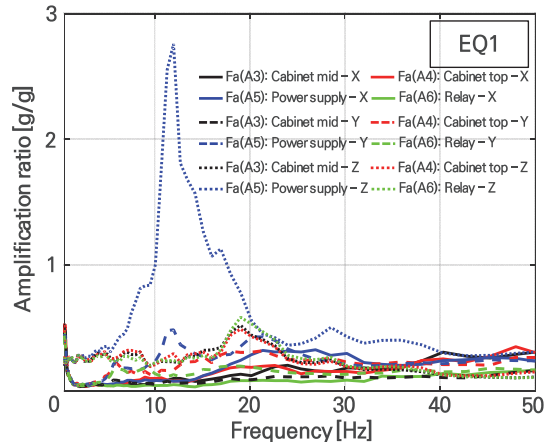


(a) EQ1

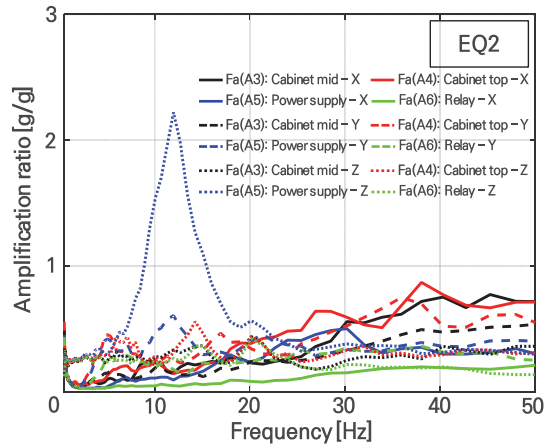


(b) EQ2

Fig. 7 Maximum acceleration responses



(a) EQ1



(b) EQ2

Fig. 8 Ratio of test response spectrum, $Fa(i)$

최대가속도 응답의 비인 $R_{a,max}$ 를 구하였다. 식 (10)에서 $a_{max,component}$ 는 RTU패널에 부착된 가속도계에서 측정된 최대가속도 응답이며, $a_{max,base}$ 는 진동대에서 측정된 최대가속도 응답이다. Fig. 9와 Table 6은 EQ1과 EQ2에 대한 $R_{a,max}$ 를 나타낸 것이다.

$$R_{a,max} = \frac{a_{max,component}}{a_{max,base}} \quad (10)$$

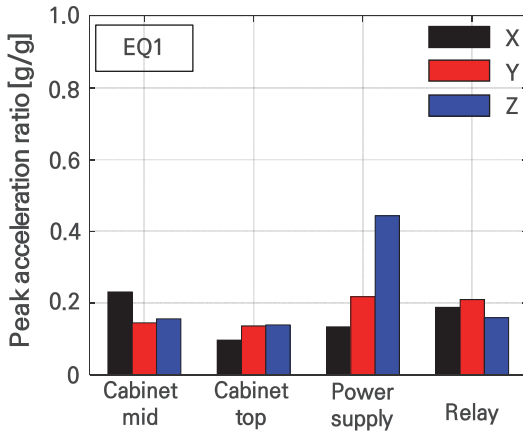
Table 6에서 EQ1의 최대가속도 증폭률은 0.44로 power supply의 상하방향에서 나타났으며, 최소 가속도 증폭률은 0.1로 외함 상부의 좌우방향에서 나타났다. EQ2의 최대가속도 증폭률은 RTU패널 중앙에서 측정된 0.69이고 최소 가속도 증폭률은 RTU패널 상부에서 측정된 0.12이다. EQ1과 EQ2의 평균가속도

증폭률은 각각 0.19와 0.39이다.

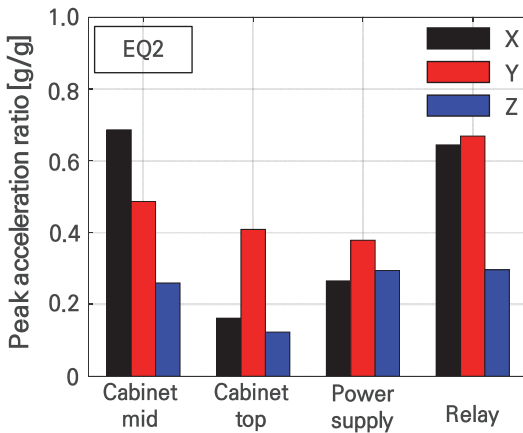
Table 7은 ZPA에 해당하는 시험응답 스펙트럼 가속도 증폭비인 $fa_{ZPA}(component)$ 를 계산하여 정리한 것이고 Fig. 10과 Table 8은 식 (11)에 따라 가속도 감소율인 R_S 를 계산하여 그래프로 표현한 것이다. ZPA는 이론적으로 가속도 시간이력에서의 최대값과 같다. 이 연구에서 입력지진동은 0.5 Hz ~ 50 Hz 영역에 대해 작성되었으므로 ZPA는 50 Hz로 간주하였다.

$$R_S = [1 - fa_{ZPA}(component)] \times 100 \quad (11)$$

EQ1에서 68% ~ 89%, EQ2에서 28% ~ 86%의 감소율이 나타났다. 특히 기기의 기능유지를 위하여 반드시 보호되어야 하는 내부 기기 위치에서의 진동



(a) EQ1



(b) EQ2

Fig. 9 Ratio of maximum response acceleration, $R_{a,max}$

Table 6 Ratio of maximum response acceleration

Input motion	Dir.	Sensor No.			
		A3	A4	A5	A6
EQ1	X	0.23	0.10	0.13	0.19
	Y	0.15	0.14	0.22	0.21
	Z	0.16	0.14	0.44	0.16
EQ2	X	0.69	0.16	0.27	0.64
	Y	0.49	0.41	0.38	0.67
	Z	0.26	0.12	0.29	0.30

Table 7 Maximum value of $fa(i)$ at ZPA

Input motion	Dir.	Sensor No.				
		A2	A3	A4	A5	A6
EQ1	X	0.15	0.32	0.29	0.23	0.17
	Y	0.24	0.17	0.27	0.24	0.17
	Z	0.11	0.12	0.16	0.32	0.11
EQ2	X	0.54	0.72	0.72	0.29	0.22
	Y	0.60	0.54	0.53	0.40	0.25
	Z	0.19	0.36	0.32	0.29	0.14

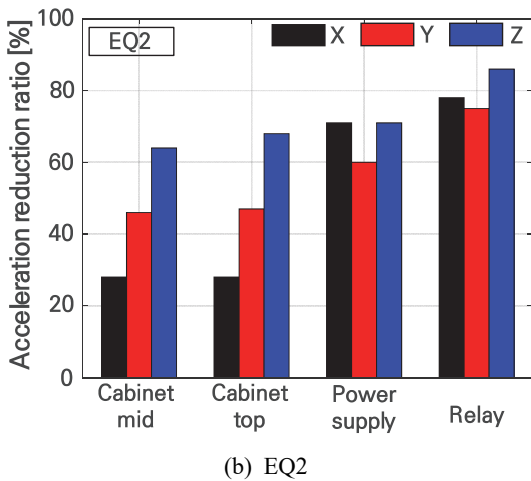
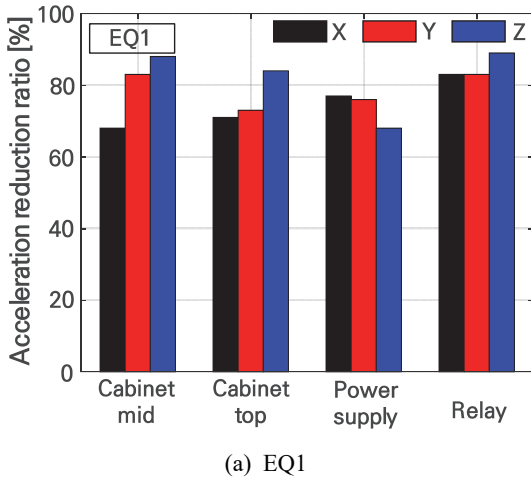


Fig. 10 Acceleration reduction ratio(R_s)

Table 8 Acceleration reduction ratio(R_s)

Input motion	Dir.	Sensor No.				
		A2	A3	A4	A5	A6
EQ1	X	85 %	68 %	71 %	77 %	83 %
	Y	76 %	83 %	73 %	76 %	83 %
	Z	89 %	88 %	84 %	68 %	89 %
EQ2	X	46 %	28 %	28 %	71 %	78 %
	Y	40 %	46 %	47 %	60 %	75 %
	Z	81 %	64 %	68 %	71 %	86 %

감소율은 EQ1일 때 68%~89%, EQ2일 때 60%~86%로 3축 동시 가진에 의한 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 평균 감소율은 EQ1일 때 80%, EQ2일 때 59%이며 수평방향보다 수직방향의 진동감소율이 우수한 것을 확인할 수 있다.

7. 요약 및 결론

이 연구에서는 부전도 면진장치를 RTU패널의 하부에 적용하여 3축 동시 가진에 의한 지진모사 실험을 수행하였다. 시험결과로부터 수평방향 뿐만 아니라 수직방향에 대한 진동 감소율을 분석하였다.

입력지진동은 구조물에 의한 지진가속도 증폭효과를 고려하여 건축물내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항을 바탕으로 작성하였으며 각각 EQ1과 EQ2로 정의하였다.

3축 진동대 시험결과 부전도 면진장치가 적용된 RTU패널의 최대가속도 응답 기반 평균가속도 증폭률은 EQ1에서 0.19, EQ2에서 0.39이며, 시험응답스펙트럼가속도에 기반한 평균 스펙트럼 가속도 감소율 R_s 는 EQ1일 때 80%, EQ2일 때 59% 수준으로 관찰되었다. 수직방향의 진동 감소율은 EQ1과 EQ2에 대하여 64% 이상으로 우수하였다.

RTU패널 하판 연결부의 응력응답을 분석한 결과 영구변형은 발생하지 않았으며, RTU패널 상단과 하단의 최대상대변위는 EQ1과 EQ2에서 모두 RTU패널 높이의 1.11% 이하로 잘 제어되었다.

시험결과로부터, 전도 방지를 위한 스토퍼와 추가 복원력 확보 및 상부구조의 이탈방지를 목적으로 하는 스프링이 적용된 볼트랜스퍼형 마찰진자시스템인 부전도 면진장치는 전후, 좌우, 상하 방향의 동시 가진에 의한 지진모사 실험 결과 지진가속도의 증폭을 제어하여 상부기기를 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 판단된다. 단 이 연구는 수직방향 지진의 크기가 수평방향의 27% 수준인 ICC-ES AC 156의 요구응답 스펙트럼을 기반으로 수행된 결과이므로 수직성분이 강한 지진에 대한 성능평가가 추가로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 앵커로 고정된 캐비닛과 면진장치가 적용된 캐비닛의 응답특성을 비교한다면 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 플랜트 연구개발 사업의 연구비 지원(과제번호 21IFIP-B128598-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Oh, S. H., Park, H. Y. and Choi, K. K., 2018, Status and Characteristics of Earthquake Damage of Nonstructural Components, *Journal of the KSNVE*, Vol. 28, No. 3, pp. 12~19.
- (2) Yoon, B. I., 2018, Nonstructural Elements Resulting From Pohang Earthquake and Direction of Future Seismic Design Nonstructural Elements, *Architectural Institute of Korea*, Vol. 62, No. 4, pp. 23~28.
- (3) Lin, F. R., Chai, J. F., Lai, Z. Y., Chen, M. Y., Huang, Y. N. and Chang, K. C., 2017, A Simplified Method for the Evaluation of Seismic Demands on In-cabinet Equipment in Motor Control Center Type Cabinets in Nuclear Power Plants, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 40, No. 3, pp. 179~190.
- (4) Kim, D. K., Cho, S. G., Joe, Y. H., Yi, J. H. and Ko, S. H., 2009, Modal Parameter Identification of Cabinets of Nuclear Power Plant, *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea Annual Spring Conference*, pp. 55~62.
- (5) Son, H., Park, S., Jeon, B. G., Jung, W. Y., Choi, J. and Ju, B. S., 2020, Seismic Qualification of Electrical Cabinet Using High-fidelity Simulation under High Frequency Earthquakes, *Sustainability*, Vol. 12, No. 19, pp. 1~14.
- (6) Jeon, B. G., Yun, D. W., Shin, Y. J. and Jung, W. Y., 2019, Seismic Performance Evaluation for Hydroelectric Power Plants RTU Panel by Shaking Table Tests, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 770~779.
- (7) Gupta, A., Rustogi, S. K. and Gupta, A. K., 1999, Ritz Vector Approach for Evaluating In-cabinet Response Spectra, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 190, No. 3, pp. 255~272.
- (8) Chang, S. J., Jeong, Y. S., Eem, S. H., Choi, I. K. and Park, D. U., 2021, Evaluation of MCC Seismic Response according to the Frequency Contents through the Shake Table Test, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 53, No. 4, pp. 1345~1356.
- (9) Yang, J., Rustogi, S. K. and Gupta, A., 2003, Rocking Stiffness of Mounting Arrangements in Electrical Cabinets and Control Panels, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 219, No. 2, pp. 127~141.
- (10) 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.
- (11) Kani, N., 2009, Current State of Seismic-Isolation Design, *Journal of Disaster Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 175~181.
- (12) Makris, N., 2019, Seismic Isolation: Early History, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 48, No. 2, pp. 269~283.
- (13) Kim, M. K., Ohtori, Y., Choun, Y. S. and Choi, I. K., 2007, Analysis of Seismic Fragility Improvement Effect of an Isolated Rotational Equipment, *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 6, pp. 69~78.
- (14) Kim, M. K., Choun, Y. S., Choi, I. K. and Seo, J. M., 2004, A Study of Seismic Capacity of Nuclear Equipment with Seismic Isolation System, *Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2765/2004*.
- (15) Choun, Y. S., Kim, M. K. and Choi, I. K., 2003, Mechanical Characteristics of Base Isolation Systems for Secondary Equipment, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Yongpyong, Korea*, Vol. 35, No. 14.
- (16) Jeon, B. G., Chang, S. J. and Kim, N. S., 2011, Seismic Performance Evaluation of Cone-type Friction Pendulum Bearing System Using Shaking Table Test, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 21, No. 7, pp. 599~608.
- (17) Kim, M. K., Choun, Y. S. and Choi, I. K., 2004, A Shaking Table Test for Equipment Isolation in the NPP (II): FPS, *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 8, No. 5, pp. 79~89.

(18) Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2019, Korean Design Standard 41 17 00.

(19) American Society of Civil Engineers, 2017, ASCE 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 13.2.5.

(20) Ministry of the Interior and Safety, 2017, Common Application of Seismic Design Criteria.

(21) American Society of Civil Engineers, 2000, ASCE 4-98, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary.

(22) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013, IEEE Std 344, IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

(23) Telcordia, 2006, Network Equipment- Building System (NEBS) Requirements: Physical Protection, GR-63-CORE, Issue 3.

(24) National Radio Research Agency, 2015, Seismic Test Method for Telecommunication Facilities.

(25) Park, S. J., Chun, N. H., Hwang, K. M., Moon, J. H. and Song, J. K., 2020, Evaluation of Acceleration Amplification Factors Based on the Structural Type of Substation for the Seismic Design of Power Facilities,

Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 33, No. 3, pp. 159~169.



Bub-Gyu Jeon received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with seismic fragility evaluation of base isolated nuclear power plant piping system. He is currently the technical laboratory manager in Seismic Simulation

Test Center. His research interests include seismic evaluation of nonstructural elements and seismic behavior of internal pressured piping system.



Woo-Yong Jung received his Ph.D. degree from the State University of New York at Buffalo with the topic related with seismic retrofitting Strategies of Semi-rigid Steel Frame by using Polymer Matrix Composite Materials. He is currently a professor

at the Department of Civil Engineering of Gangneung-Wonju National University.