



진동대 시험을 이용한 수력발전소 RTU 패널의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation for Hydroelectric Power Plants RTU Panel by Shaking Table Tests

전 법 규* · 윤 다 운* · 신 용 재* · 정 우 영†
Bub-Gyu Jeon*, Da-Woon Yun*, Yong-Jae Shin* and Woo-Young Jung†

(Received September 24, 2019 ; Revised October 21, 2019 ; Accepted October 21, 2019)

Key Words : Shaking Table Test(진동대 시험), Seismic Performance Evaluation(내진성능 평가), Electrical Cabinet(전기 캐비닛), Hydroelectric Power Plants(수력발전소)

ABSTRACT

In Korea, many facilities were damaged due to the Gyeongju and Pohang earthquakes in 2016 and 2017, respectively. In recent years, earthquakes have caused more damage to non-structural components than to structures. Among these non-structural components, electrical panels are one of the most important devices used to maintain the function of their facility. Thus, damage to equipment related to facility safety can lead to serious accidents involving life and property damage. For nuclear power plant facilities, strict seismic performance verifications are required to ensure the safety of major equipment. In the case of broadcasting and telecommunications facilities, these are required to evaluate their seismic performances by shaking table tests. However, the shaking table test method for the seismic performance evaluation of hydroelectric power plant electrical panels has not been proposed. In addition, there are not many examples certifying the seismic performance of electric panels by shaking table tests. Therefore, in this study, seismic performance evaluation was performed using a shaking table test on the remote terminal unit (RTU) panels used in hydroelectric power plants.

1. 서 론

국내 연평균 지진발생 횟수는 디지털 관측을 시작한 1999년 이후 증가하는 추세이며⁽¹⁾ 2016년과 2017년에 경주와 포항지역에서 발생한 지진으로 상당수의 지진피해가 보고되었다. 최근 국내의 지진피해사례를 살펴보면 다수의 지진피해가 구조요소가 아닌 비구조요소의 손상에 의해 발생하고 있다. 특히 국내와 같

은 중진 지역에서는 지진피해의 양상이 비구조요소에 더욱 집중될 가능성이 높다⁽²⁾. 지진과 관련되어 비구조요소는 건축구성요소 중 주요 구조부에 연속되어 있지만 외부하중을 지지하지 않는 것으로서 시설의 고유한 기능을 수행하는 소재 및 부품으로 정의할 수 있다. 비구조요소는 크게 건축비구조요소와 기계 및 전기 비구조요소로 분류 할 수 있다. 전기 캐비닛은 대표적인 기계 및 전기 비구조요소로서 전기회로의 유지 및 중앙제어, 통신 등과 같이 시설의 고유기능

† Corresponding Author ; Member, Gangneung-Wonju National University

E-mail : woojung@gwnu.ac.kr

* Seismic Research and Test Center, Pusan National University

‡ Recommended by Editor Soo Il Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

을 유지하기 위해 사용된다. 따라서 시설안전과 관련된 기기의 손상은 인명과 재산피해를 동반하는 중대한 사고로 이어질 수 있다. 우리나라는 2019년 3월 개정된 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)⁽³⁾에서 지진 발생이후에 그 기능이 반드시 유지되어야 하는 주요 비구조요소에 대하여 내진성능을 증명할 것을 규정하고 있다. 원자력 발전소의 경우 안전과 관련된 주요 기기의 엄격한 내진성능 검증이 요구되고 있으며, 방송통신시설에서는 방송통신설비의 내진 시험방법⁽⁴⁾으로 진동대 시험 또는 해석으로 기본적인 내진 설계를 검증하도록 하고 있다. 하지만 국내에서는 아직 원자력을 제외한 발전시설의 내진성능을 검증하기 위한 시험평가 방법 또는 절차가 명확하게 제시되지 않은 실정이다.

미국의 ASCE 7과⁽⁵⁾ IBC(international building code 2015)에서는⁽⁶⁾ 필요할 경우 비구조요소의 내진성능을 실험적인 방법으로 검증할 것을 권고하고 있으며, 적절한 시험방법이 없을 경우 ICC-ES AC 156에⁽⁷⁾ 따라 내진성능 평가를 수행할 것을 권고하고 있다. ICC-ES AC 156은 비구조요소의 내진성능을 평가하기 위한 진동대 시험방법으로서 정의되지 않은 구조물의 층 응답을 계산할 수 있는 발전된 시험방법이다. 이 시험방법은 미국 캘리포니아주의 병/의원 납품 기기 및 설비에 대한 내진성능 검증을 위해 적용되고 있는 방법(OSHPD, California's office of statewide health planning and development)이며 설계지진에 대한 최소한의 성능유지를 확인하기 위해 널리 이용되고 있다.

이 연구에서는 수력발전소에서 사용하였던 전기기기의 내진성능 평가를 위하여 진동대 시험을 수행하고자 하였다. 진동대 시험방법은 ICC-ES AC 156을 참조하였으며, 건축물 내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항을⁽⁸⁾ 만족하도록 ICC-ES AC 156 규격에 따라 요구응답 스펙트럼(required response spectrum, RRS)과 인공지진파의 가속도시간이력을 작성하고 가속도 배율을 조정하여 적용하였다. 또한 경주지진과 포항지진을 입력지진동으로 하여 국내 기록지진에 대한 수력발전소 전기 패널의 내진성능을 평가하고 지진거동특성을 분석하고자 하였다. RTU (remote terminal unit)는 전자제어장치의 일종으로 데이터 전송을 담당하는 기기로서 복잡한 회로와 릴레이가 적용된다. 이 연구에서는 실제 수력발전소에서 최근까

지 사용된 RTU 패널을 확보하여 구조적 또는 기능적 손상이 발생할 때까지 입력지진동의 가속도배율을 조정하며 실험을 진행하였으며, 앵커하중응답, 지진거동특성, 내부 기기의 가속도 응답과 전기적인 기능유지 여부를 확인하였다.

2. 기계 및 전기 설비의 내진시험 방법

기계 및 전기설비의 내진성능 평가를 위해 국내의 산업 전반에서 진동대를 이용한 시험방법이 적용되고 있다. 변전소 시설에 대한 내진안전성은 IEEE Std 693에서⁽⁹⁾ 요구하고 있는 시험절차에 따라 수행하고 있으며, IEC 62271-210에⁽¹⁰⁾ 의하여 고전압 스위치기어에 대한 시험이 국내에서 수행된 바 있다. 통신장비에 대해서는 Telcordia 사의 GR-63-CORE에⁽¹¹⁾ 의한 시험이 북미지역에서 적용되고 있다. 원자력발전소의 주요기기의 내진성능검증에는 IEEE Std 323⁽¹²⁾, IEEE Std 344⁽¹³⁾ 또는 IEEE Std 382⁽¹⁴⁾ 등의 기준이 적용된다.

국내에서는 전기, 전자 기기의 내진시험방법의 지침으로 IEC 60068-3-3을⁽¹⁵⁾ 번역하여 기술적 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 작성한 규격을 제시하고 있으며, 방송통신설비의 내진 시험방법(국립전파연구원, 2015)이 제정되어 전기, 방송(통신) 설비에 대한 내진시험 방법론을 제시하고 있다. 국내 원자력발전소의 안전관련 기기의 경우 IEEE Std 323과 IEEE Std 344을 준용하여 원전안전관련설비 성능검증(원자력 안전법 시행규칙 총리령 제 1180호, 2015.7.21.)에 의거 하여 진행되고 있다.

앞서 서술한 시험방법들 중 IEEE Std 344는 원자력 기기의 내진시험방법으로 안전성 및 합리성이 입증된 시험방법이나 원자력 발전소 설계기준에 따르며 지나치게 보수적일 수 있다. IEEE Std 693은 변전시설에 국한된 시험검증방법으로서 복잡하며 일반적인 시설 및 설비에 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. IEC 60068-3-3은 입력지진동이 제시되지 않으며 방송통신설비의 내진시험방법은 통신설비가 설치되는 구조물에 대한 해석적 연구를 바탕으로 RRS가 제시되었다. 이와 같이 앞서 서술한 시험방법들은 각 분야에 적용할 수 있도록 개발된 것으로 수력발전소의 기기에 적용하기 곤란할 수 있다. 최근 대한전기협회에서 수·화력 발전설비의 내진설계 기준을 마련하기 위한 노력이 수행

되고 있으나 내진성능평가를 위한 시험평가 방법은 제안되지 않은 실정이다. 따라서 이 연구에서는 수력발전소에 적용되는 전기 패널의 내진성능평가를 위하여 가장 최근에 제안되었으며, 보편적으로 적용 가능하며 국내 내진설계기준들을 만족하는 지진하중의 제시가 가능한 ICC-ES의 AC 156의 시험방법을 선택하였다. 이 시험방법은 일반적인 비구조요소의 내진성능 검증을 위한 것으로서 ASCE 7, IBC 등의 설계기준과 FEMA 461⁽¹⁶⁾ 및 IEEE Std 344 등의 타 시험규격들을 참조하여 진동대 장비를 이용한 시험절차와 방법을 체계적으로 정리하여 제시하고 있다.

3. 입력지진동

3.1 인공지진

이 연구에서는 국내의 건축물 내진설계 기준 및 내진설계기준 공통적용사항을 고려하여, ICC-ES AC 156의 요구사항에 따라 RRS와 가속도시간이력을 작성하였다. 건축물 내진설계기준에 따라 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})를 계산하면 식 (1)과 같다. 단, 연약지반의 경우 지반조사를 통하여 입력지반운동을 결정하여야 하므로 변수에서 제외하는 것이 바람직하다. 식 (1)에서 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. 발전용 수·화력 설비, 송전설비, 배전설비, 변전설비 등 관계 법령에 따라 내진설계를 해야 하는 대부분의 발전시설은 중요시설에 해당하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 지진재현주기를 2400년으로 정의하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

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

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

건축구조물이 아닌 경우 2017년 제안된 내진설계기준 공통적용사항을 참조하여 결정할 수 있다. 내진설계기준 공통적용사항은 시설별 내진설계기준의 일관성 유지를 위하여 대부분의 국내 시설의 내진설계에 반영하는 것을 목적으로 제안된 것으로 ASCE 7, IBC 및 건축물 내진설계기준과 연계가 가능하다. 유효지반 가속도(S)의 계산은 식 (2)와 동일하지만 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})는 식 (1)과 차이가 있으며 식 (3)과 같다. 즉 건축물 내진설계 기준과 내진설계기준 공통적용사항의 S_{DS} 는 2/3배의 차이를 나타낸다. F_a 를 1.5로 가정하고 S 가 0.22일 경우, 내진설계기준 공통적용사항의 S_{DS} 는 0.825이다.

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

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

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

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

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

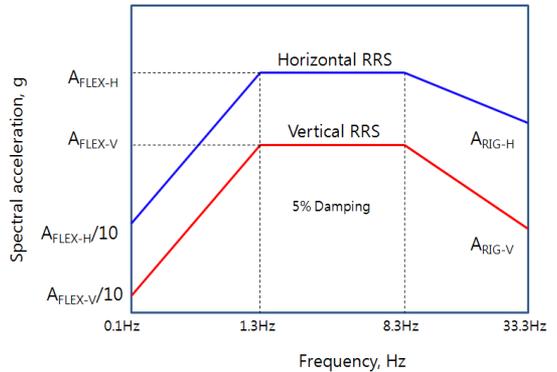


Fig. 1 ICC-ES AC 156 RRS

Table 1 Seismic parameters of RRS for artificial earthquakes

Amplification of artificial earthquake (%)	Code	S_{DS}	z/h	A_{FLEX-H}	A_{RIG-H}	A_{FLEX-V}	A_{RIG-V}
100	KDS	0.55	1	0.88	0.66	0.36	0.14
150	Common application of seismic design criteria	0.825	1	1.32	0.99	0.55	0.22
200	-	1.10	1	1.76	1.32	0.73	0.29

인공지진의 가속도시간이력 생성을 위한 ICC-ES AC 156의 RRS는 Fig. 1과 같으며 seismic parameter 는 Table 1에 나타내었다. 기기 설비는 정의되지 않은 임의의 구조물의 모든 층에 설치될 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 가장 엄격한 조건인 최상층 설치를 고려하여 구조물과 설치 위치의 비(z/h)를 1로 가정하였다. RRS는 ICC-ES AC 156의 요구사항에 따라 작성하였으며 감쇠비는 5%이다. 식 (4), (5)는 수평방향, 식 (6), (7)은 수직방향의 스펙트럼가속도(spectral acceleration)결정을 위한 식이다. 여기서, A_{FLX-H} 는 S_{DS} 의 1.6배를 초과할 수 없다. 시간이력은 ASCE 4-98⁽¹⁷⁾을 참조하여 사다리꼴 포락함수를 적용하였다. MTS의 STEX프로그램을 사용하였으며 각 축 방향의 상관관계를 검토하였다. 서로 다른 두 방향의 상관관계는 ASCE 4-98과 IEEE Std. 344를 참조하여 상관계수함수(correlation function)값이 0.3 이하가 되도록 하였으며 진동지속시간과 강진지속시간은 각각 30초와 20초로 작성하였다.

이 연구에서는 건축물 내진설계 기준을 만족하도록 작성한 S_{DS} 가 0.55인 인공지진을 100%가속도 배율로, 내진설계기준 공통적용사항을 바탕으로 하는 S_{DS} 가 0.825인 경우가 150%로 정의하였으며, 가속도 배율을 조정하여 200%까지 가진하였다.

3.2 기록지진

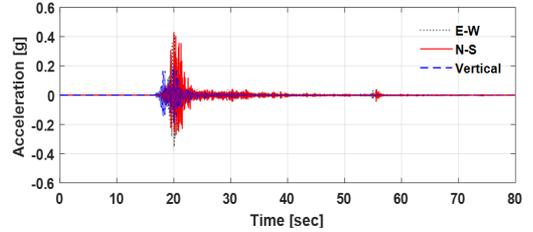
이 연구에서는 진동대 시험을 위한 입력지진동으로 국내에서 발생한 지진 중, 가장 피해가 컸던 경주지진과 포항지진을 선택하였다. Fig. 2는 기상청의 관측소에서 기록된 경주지진과 포항지진의 시간이력이다.

4. 진동대 시험

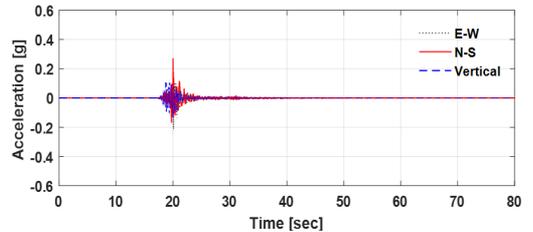
4.1 RTU 패널 및 계측기의 설치

시험대상설비는 수력발전소에서 사용하였던 RTU 패널이며 Fig. 3과 같이 RTU 패널 2기가 열반되어 있다. 하부 채널(base channel)과 후설치 세트앵커볼트는 Fig. 4의 왼쪽 그림과 같다. 채널은 상부의 외함고 8개의 M8 볼트로 연결되어 콘크리트 바닥에 4개의 M12 앵커볼트로 고정된다. 또한 2개의 파스너(fastener)가 하부 채널에 용접으로 부착되어 2개의 M8 앵커볼트가 추가되었다. 진동대 시험 수행 시 현장조건을 최대한 모사하기 위하여 콘크리트 슬래브에 후설치 세트앵커

볼트로 하부 채널을 고정하였으며, 패널의 하단, 중간, 상단과 내부의 주요 부품인 power supply와 relay 주변에 가속도계를 설치하였다. Fig. 4의 오른쪽 그림은 각 부품의 사진이다. 앵커볼트의 인발력 계측을 위하여 로드셀을 설치하였으며, 패널과 채널의 앵커연결부의 국부변형 확인을 위한 변형률게이지를 설치하였다. 또한 패널과 채널에 Fig. 5와 같이 target을 부착하여 상대변위를 영상처리방법으로 계측하여⁽¹⁸⁾ 로킹(rocking)의 발생을 관찰하였다. 또한 패널의 상단과



(a) Kyeongju (USN) earthquake



(b) Pohang (PHA2) earthquake

Fig. 2 Acceleration time histories of gyeongju and Pohang earthquake

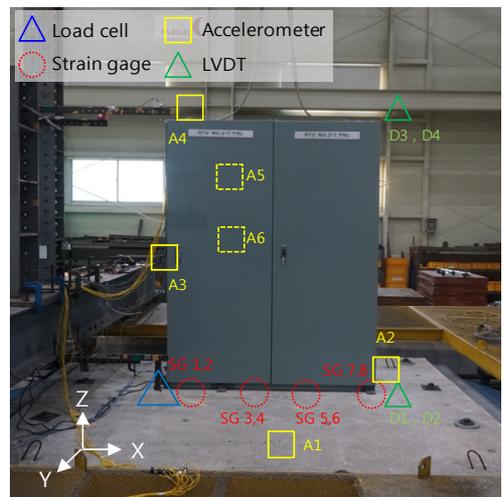


Fig. 3 Sensor location and RTU panel on concrete slab

하단에 변위계(LVDT)를 설치하여 지진하중에 의한 상대변위를 계측하였다. 그리고 지진하중 하에서 기기의 기능이 유지되는지 확인하기 위하여 AC/DC transducer를 이용하여 주회로의 전기신호를 계측하였다. 모든 계측기의 신호는 512 Hz로 계측되었다.

4.2 시험절차

시험절차는 Table 2와 같다. 국내 기록지진인 경주 지진과 포항지진을 가진한 후 Table 1의 인공지진을 가속도 증폭비의 크기 순서로 가진하였다. RTU 패널의 동특성을 확인하기 위하여 각 시험 전에 공진탐색 시험(resonance search test)을 수행하였으며, 기능검사와 육안검사를 각 시험의 전, 중, 후에 수행하여 기기의 기능 및 구조적 건전성을 확인하였다. 진동대 시험은 부산대학교 지진방재연구센터의 6자유도 진동대를 이용하여 수행하였으며 Table 3은 진동대의 사양이다.

5. 시험결과

5.1 육안검사 및 기능검사

Table 2의 순서에 의해 진동대 시험을 수행하였다.

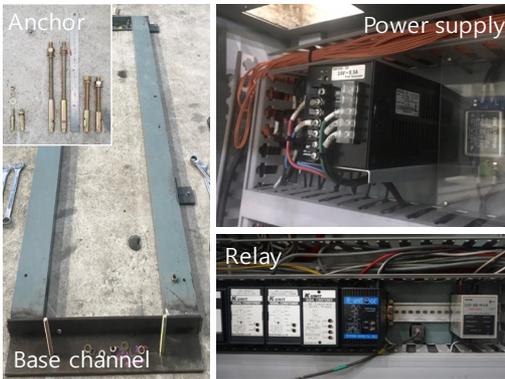


Fig. 4 Base channel, anchor and major sub-components

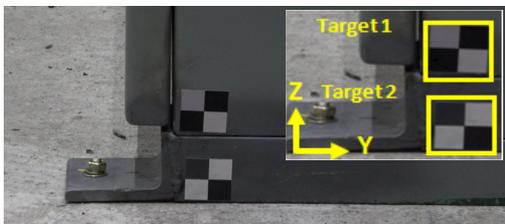


Fig. 5 Digital image processing target at base channel and bottom of enclosure

모든 시험에서 계측된 전기신호의 단락은 발생하지 않았다. 따라서 전기적인 기능이 정상적으로 작동한 것으로 간주하였다.

포항지진과 인공지진 150 % 시험 후 전선 트레이의 몰드가 이탈되었으나 기능에 영향을 미치지 않았으며 200 %가진 시 문 고정 장치가 파손되어 실험을 중단하였다. Fig. 6은 탈락된 몰드와 파손된 문 고정 장치의 사진이며 Fig. 7은 손상된 앵커볼트와 패널 하부의 국부변형을 기록한 사진이다. 모든 시험 종료 후 RTU 패널을 콘크리트 슬래브에서 제거하였을 때, M8 앵커

Table 2 Shaking table tests procedure

Test no.	Test name	Remarks
1	Inspection	Visual inspection
2	Function verification	Voltage check
3	Resonance search test #1	Sinusoidal sweep, 2 Otc./min., 1 Hz ~ 50 Hz, 0.07 g
4	Gyeongju (USN)	Tri-axial testing
5	Pohang (PHA2)	
6	Inspection	Visual inspection
7	Function verification	Voltage check
8	Resonance search test #2	Sinusoidal sweep, 2 Otc./min., 1 Hz ~ 50 Hz, 0.07 g
9	Artificial earthquake 100 %	Multi-frequency seismic simulation tests, tri-axial testing, time duration 30 s, strong motion time duration 20 s
10	Artificial earthquake 150 %	
11	Artificial earthquake 200 %	
12	Inspection	Visual inspection
13	Function verification	Voltage check

Table 3 Shaking table specification

Category	Specification
Size	4 m × 4 m
Maximum payload	30 ton
Frequency range	0.1 Hz ~ 60 Hz
Maximum stroke	Horizontal : ±300 mm, ±200 mm Vertical : ±150 mm
Maximum acceleration	±3 g (bare table condition)

볼트 2개의 부착력이 소실되었음을 확인하였으며 하부 채널과 연결되는 패널 하부의 연결볼트 주변에서 컵모양의 국부적인 영구변형(cup-like deformation)이 확인되었다. ICC-ES AC 156에서는 하중을 받는 부재 또는 주요 연결볼트 등 구조부재의 파손은 허용하지 않으나, 전구 교체와 같은 경미한 손상은 허용하고 있다. 따라서 각각 국내 건축물 내진설계기준 및 내진설계기준 공통적용사항에 기반하여 작성된 인공지진 100%와 150%에 대한 시험에서는 RTU 패널의 기능적, 구조적 이상은 발생하지 않은 것으로 간주하였다. 하지만 국내 방송통신 설비의 내진설계 기준에서는 설치된 구성품의 이탈 또는 육안으로 확인 가능한 변형이 발생하지 않아야 하며, 원자력 기기 성능검증사례에서 또한 부품의 이탈이나 탈락은 허용하지 않는 경우가 대부분이다. 따라서 향후 발전설비의 내진성을 평가하기 위한 진동대 시험방법을 제안하거나, 기존의 시험방법에 따라 평가를 수행할 경우 기능 및 구조에 미치는 영향이 경미한 손상에 대하여 논의할 필요가 있을 것으로 판단한다.

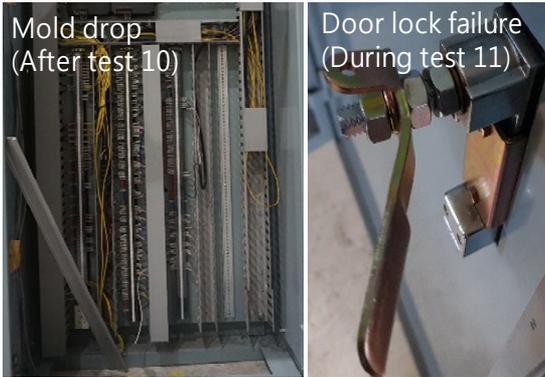


Fig. 6 Mold drop and door lock failure

5.2 공진탐색 시험

식 (8)과 같이 진동전달함수 $H_{xy}(f)$ 는 진동대 바닥에서 측정한 가속도 신호인 $P_{yx}(f)$ 와 응답가속도신호의 전달함수 $P_{xx}(f)$ 를 이용하여 결정하였다. Table 4는 공진탐색시험의 결과이다. 경주지진과 포항지진 가진 후 공진점이 10%~14% 낮아진 것이 확인되었다. 따라서 경주지진과 포항지진 가진 후 육안 점검에서 이상이 없었으나, 구조적인 문제가 발생하기 시작한 것으로 판단된다.

$$H_{xy}(f) = P_{yx}(f) / P_{xx}(f) \tag{8}$$

5.3 응답신호의 분석

Fig. 8은 대표적인 앵커하중, 패널과 하부 채널 연결볼트 주변의 변형률, 주요 기기에서의 가속도 응답이다. 국내 기록지진인 포항과 경주지진의 가진에 의한 주요 위치에서의 응답신호들의 값은 높지 않으며 인공지진 100% 가진 시에도 변형률 이상신호는 발견되지 않는다. 그러나 내진설계기준 공통적용사항을 고려한 인공지진 150% 가진 시 RTU 패널-하부 채널 고정볼트 주변에서 0.002이상의 변형률이 측정되



Fig. 7 Anchor bolt failure and local deformation after test 11 (200%)

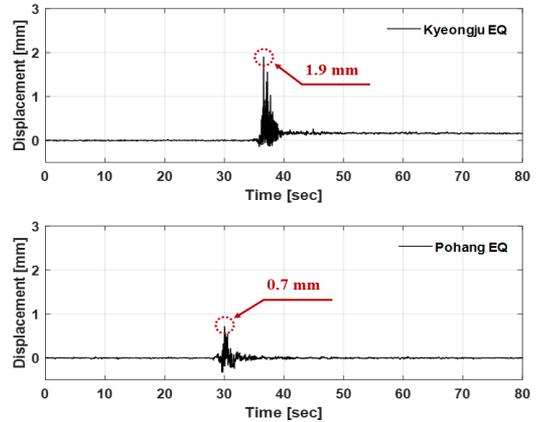
Table 4 Results of resonance search tests

Location	X			Y			Z		
	#1	#2	Error	#1	#2	Error	#1	#2	Error
A2 (enclosure bottom)	15	15	0 %	15	15	0 %	N/A	N/A	N/A
A3 (enclosure mid)	5.25	4.5	14 %	5.25	4.75	10 %	N/A	N/A	N/A
A4 (enclosure top)	5.25	4.75	10 %	5.25	4.75	10 %	N/A	N/A	N/A
A5 (power supply)	5.25	4.75	10 %	5.25	4.75	10 %	12	12	0%
A6 (near relay)	5.25	4.5	14 %	5.25	4.75	10 %	N/A	N/A	N/A

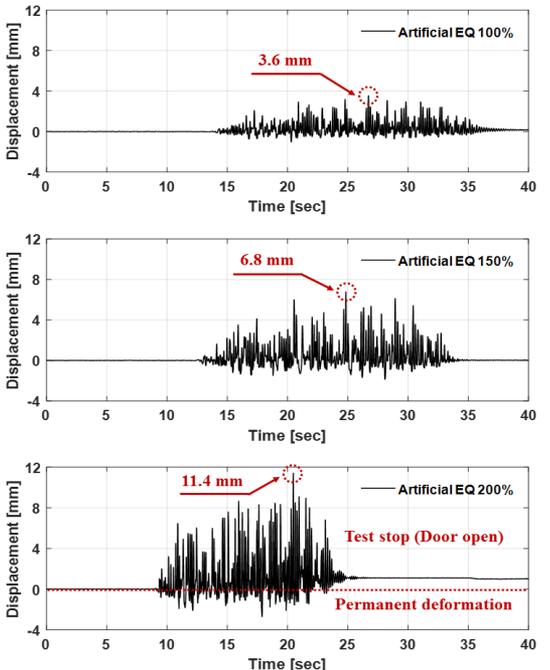
었다. 또한 인공지진 200% 가진 시 충격신호가 로드 셀에서 계측되었으며, 충격신호의 발생 지점에서 패널 고정볼트 주변의 영구변형이 크게 발생하는 것이 계측되었다. 시험 종료 후 계측된 누적소성변형률은 0.004이다. 또한 문 고정 장치의 파손으로 문이 열려 발생한 충격으로 16.12 g의 가속도값이 relay 위치에 부착된 가속도계에서 계측되었다.

Fig. 9는 영상처리기법을 이용하여 패널 하부와 하부 채널의 상대변위를 계측한 것이다. Fig 9(a)에서와 같이 경주지진과 포항지진의 상하방향 상대변위는 각각 1.9 mm와 0.7 mm이다. Fig. 9(b)에서 확인할 수 있듯이 인공지진 100%의 상하방향 상대변위는 3.6 mm이며, 인공지진 150%에서는 6.8 mm, 200%에서는 11.4 mm로 상대변위 값이 크게 증폭된다. Yun et al. 은⁽¹⁹⁾ 캐비닛이 앵커볼트로 고정될 경우 지진에 의한 로킹(rocking)으로 캐비닛 하부와 바닥의 충격이 발생할 수 있으며, 이 충격으로 앵커 하중응답이 증가시킬 수 있음을 진동대 시험으로 증명하였다. 따라서 이 연구에서는 가속도 응답에서 충격신호를 확인할 수 있으며 6.8 mm의 비교적 큰 상대변위가 발생한 인공지진 150%와 200%의 진동대 시험에서 로킹과 들림(uplifting)에 의한 충격이 발생한 것으로 판단하였다.

국내 기록지진과 인공지진의 가속도 배율을 조정하여 시험한 모든 시험에서 RTU 패널 주요위치의 가속도응답과 입력지진가속도의 진동전달함수(transfer function)는 Fig. 10과 같다. 캔틸레버 형식으로 고정된 power supply는 모든 시험에서 진동 전달률이 60을 초과하고 있다. 따라서 캔틸레버 형식으로 부착된 내부기기는 지진에 취약할 수 있을 것으로 판단된다. 입력지진동의 크기가 커질수록 30 Hz 이상의 모든 주파수 영역에서 진동전달함수 값이 크게 나타나는 것



(a) Relative displacement of recorded earthquakes



(b) Relative displacement of artificial earthquakes

Fig. 9 Relative displacement between encloser bottom and base channel

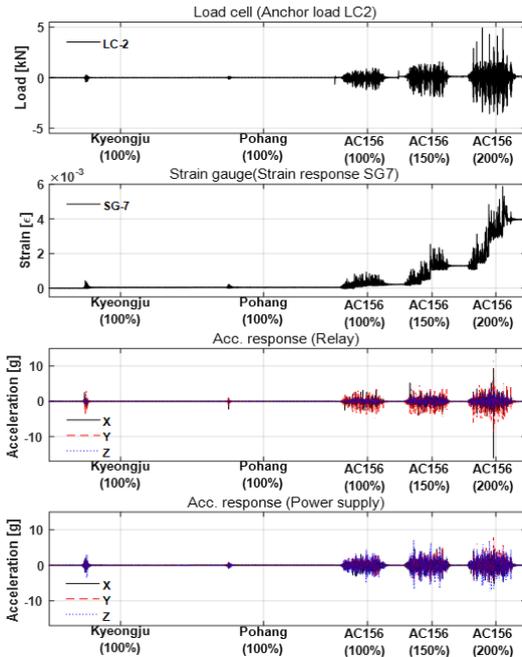


Fig. 8 Response signals of shaking table tests

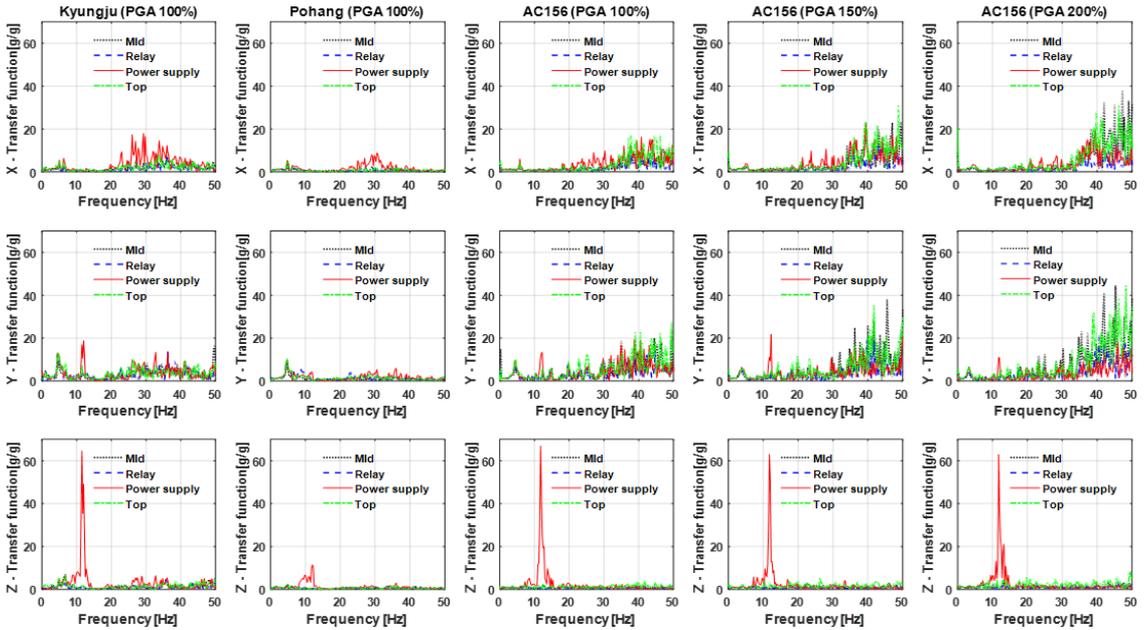


Fig. 10 Transfer function of each tests

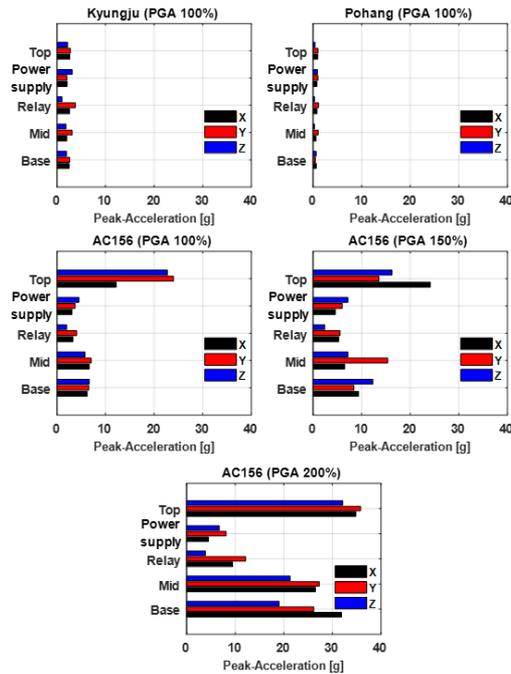


Fig. 11 Peak acceleration responses

이 확인된다. 이러한 현상은 RTU 패널이 강력한 지진동에 의해 하부 채널로부터 들림으로 인한 로킹이 발생하고 이에 따른 패널과 하부 채널의 충돌에 의하여 나타나는 현상으로 분석할 수 있다.

Fig. 11은 각 시험에서의 최대가속도 응답으로, 인공 지진 200%에서 RTU 패널의 하부에 설치된 가속도계에서 계측된 응답과 최상단에서 계측된 가속도 응답이 내부 가속도 응답과 비교하여 크게 나타나고 있다. 로킹과 들림에 의한 패널 하부의 충격이 패널 하부에 설치한 가속도계(A2)에서 계측되었으며, 충격은 프레임을 따라 상단으로 전달되어 Fig. 10 및 Fig. 11의 결과와 같이 RTU 패널 상부에서 최대가속도 값이 계측된 것으로 판단된다. 또한 같은 이유로 30 Hz 이상의 고주파 영역에서 진동전달함수가 충격 신호와 같이 모든 대역에 걸쳐 높게 나타나는 것으로 판단된다(20).

5.4 실험결과의 요약

내진설계기준 공통적용사항을 만족하도록 작성된 인공지진 150%의 진동대 시험 종료 후 RTU 패널의 구조적 손상은 발견되지 않았다. 단, 패널 내부의 전선 몰드가 일부 탈락하였으나 기능에 영향을 미치지 않는 경미한 손상으로 판단하였다. 하지만 대부분의 내진성능 검증 방법은 구성품의 탈락 또는 변형을 허용하지 않는다. 따라서 앞으로 발전설비의 내진성능을 평가하기 위한 진동대 시험방법을 제안하거나, 기존의 시험방법에 따라 평가를 수행할 경우 기능 및 구조에 미치는 영향이 미미한 손상의 허용 여부에 대하여 논의할 필요가 있을 것으로 판단한다.

6. 요약 및 결론

이 연구에서는 ICC-ES AC 156에서 제안된 절차에 따라 건축물 내진설계기준 및 내진설계기준 공통 적용사항을 만족하는 인공지진을 작성하고 가속도 배율을 50%씩 증가하며 진동대 시험을 수행하였다. 또한 국내 기록지진 경주지진과 포항지진을 입력지진 동으로 선택하였다. 진동대 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 설계 지진을 초과하는 인공지진 200% 시험 중, RTU 패널의 문 고정 장치가 파손되어 문이 열림에 따라 시험을 중단하였다. RTU 패널과 같은 캐비닛 기기는 진동대를 이용한 내진시험에서 문이 열리는 사례가 빈번하다. 따라서 문의 고정 장치 또한 보강되어야 할 필요가 있는 것으로 사료된다.

(2) 인공지진 150% 가진 시 RTU 패널-하부 채널 고정볼트 주위에서 변형률이 0.002를 초과하였다. 인공지진 200% 시험에서 0.004의 누적소성변형 발생하였으며 RTU 패널-하부 채널 연결 볼트 위치의 국부변형이 육안으로 확인되었다. 따라서 이 연구의 시험대상설비인 RTU 패널의 고정부는 설계 지진에서 소성변형이 발생하기 시작한 것으로 판단된다.

(3) 영상처리기법으로 계측된 RTU 패널 하부와 하부 채널의 상대변위를 계산한 결과, 로킹 및 들림 현상에 의해 상대변위가 발생한 것으로 판단되며, 로킹에 의한 충격으로 패널 하부와 상단의 가속도 응답이 크게 상승하는 것을 확인하였다. 따라서 RTU 패널의 외함과 하부 채널 연결부에서 발생한 충격은 패널의 프레임을 따라 상단으로 전달되는 것으로 추측하였다. 이와 같이 강한 지진동에 의해 발생할 수 있는 로킹은 기기 및 설비의 고정부에 국부적인 소성변형을 유발할 수 있으며, 충격에 의한 하중증가 및 응답 증폭이 발생할 수 있음이 실험으로 확인되었다.

이 연구결과를 바탕으로 캐비닛 기기의 내진보강을 위하여 구조물의 바닥과 앵커로 고정된 하부 채널 등을 이용하여 기기가 고정되는 경우, 하부 채널과 연결되는 패널 하부의 보강이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 이 연구의 결과는 지진하중으로 인한 전기캐비닛의 거동특성을 분석 및 사용 중인 설비의 내진보강 대책을 수립을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 국토교통부 플랜트 연구개발 사업의 연구비 지원(과제번호 19IFIP-B128598-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Ministry of the Interior and Safety, 2017, Pohang Earthquake White Paper.
- (2) Oh, S. H., Park, H. Y. and Choi, K. K., 2018, Current Status and Characteristics for Nonstructural Components Damage by Earthquake, Vol. 28, No. 3, pp. 12~19.
- (3) Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2019, Standard for Seismic Design of Buildings, Korean Design Standard (KDS 41 17 00).
- (4) National Radio Research Agency, 2015, Seismic Test Method for Telecommunication Facilities.
- (5) American Society of Civil Engineering, 2016, Testing Alternative for Seismic Capacity Determination, ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, No. 13.2.5.
- (6) International Code Council, 2015, International Building Code.
- (7) ICC Evaluation Service, 2015, Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-table Testing of Nonstructural Components, ICC-ES AC156-2010, <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac156/>.
- (8) Ministry of the Interior and Safety, 2017, Common Application of Seismic Design Criteria.
- (9) Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, IEEE 693.
- (10) International Electrotechnical Commission, 2013, High-voltage Switchgear and Controlgear – Part 210: Seismic Qualification for Metal Enclosed and Solid-insulation Enclosed Switchgear and Controlgear Assemblies for Rated Voltages above 1 kV and up to and Including 52 kV, IEC TS 62271-210:2013.
- (11) Telcordia, 2006, Network Equipment - Building System(NEBS) Requirements: Physical Protection, GR-63-CORE Issue3.

(12) Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 323.

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

(14) Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, IEEE Standard for Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 382.

(15) International Electrotechnical Commission, 1991, Environmental testing - Part 3-3: Guidance - Seismic Test Methods for Equipments, IEC 60068-3-3.

(16) Federal Emergency Management Agency, 2007, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA 461.

(17) American Society of Civil Engineering, 2000, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, doi: 10.1061/9780784404331.

(18) Kim, S. W., Choi, H. S., Jeon, B. G. and Hahm, D. G., 2019, Low-cycle Fatigue Behaviors of the Elbow in a Nuclear Power Plant Piping System Using the Moment and Deformation Angle, Engineering Failure Analysis, Vol. 96, pp. 348~361.

(19) Yun, D. W., Jeon, B. K., Shin, Y. J., Chang, S. J. and Jung, W. Y., 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.

(20) Yun, D. W., Chang, S. J., Jeon, B. G., Eem, S. H. and Choi, I. K., 2019, An Experimental Study on Characteristics of Vibration Caused by Rocking Modes of Electric Cabinet under Seismic Loading, Structural

Mechanics in Reactor Technology, Proceedings of the SMiRT 25 Conference, Charlotte, NC.



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 research manager in Seismic Research and Test Center. His research interests include seismic evaluation of nonstructural components and seismic behavior of internal pressurized piping system.



Da-Woon Yun received his M.S. degree from Pusan National University with the topic related with evaluation on behavioral characteristics of RC tensile member depending on the steel ratio by using image processing method. He is currently the research associate in Seismic Research and Test Center.



Woo-Young 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.