

콘크리트 슬래브에 고정된 사용 후 몰드변압기의 지진 응답 특성

Seismic Response Characteristics of Used Molded Transformer Anchored on Concrete Slab

이 상 문* · 전 범 규** · 윤 다 운** · 김 성 완** · 정 우 영†

Sang-Moon Lee*, Bub-Gyu Jeon**, Da-Won Yoon**, Sung-Wan Kim** and Woo-Young Jung†

(Received October 13, 2020 ; Revised November 30, 2020 ; Accepted December 1, 2020)

Key Words : Molded Transformer(몰드변압기), Seismic Load(지진 하중), Shaking Table Test(진동대 시험), Seismic Performance Evaluation(내진성능 평가), Anchorage Load(앵커 인발력)

ABSTRACT

In this study, shaking table tests were conducted for the molded transformers used in hydropower plants. To implement the actual site conditions, the anchor bolt was installed and secured to the concrete slab with the load cell installed in the anchorage to observe and analyze the load generated by seismic on the anchor. The sine sweep waveform was applied in a short direction to determine the unique frequency of the sample. Moreover, the seismic waves in these shaking table tests were applied to artificial earthquakes (4 stages) that met the ICC-ES AC156 conditions and based on Pohang and Kyungju earthquakes. The results of the experiment show that there was no functional damage to the molded transformer. However, structural damage occurred after the Kyungju and Pohang earthquakes condition. The vibration transmission function of the lower frame was the highest, while for the uppermost frame was the lowest. Additionally, large relative displacement between the upper and lower parts caused by non-linear behavior of the lower frame may result in a collision or impact damage with the surrounding device or equipment.

1. 서 론

전 세계적으로 규모 5.0 이상의 지진이 급격하게 증가하고 있다. 국내 또한 2010년 이후 크고 작은 지진의 발생빈도가 증가하고 있으며⁽¹⁾ 2016년과 2017년에 각각 경주와 포항에서 규모 5.8과 규모 5.4의 대

규모 지진이 발생하였다. 경주 지진은 지진관측 이후 최대지진으로서 가속도 응답스펙트럼의 일부 진동수 구간에서 내진설계 기준을 초과하였으며 포항 지진은 건축물과 설비에 큰 피해를 초래하였다. 특히 사회간접자본의 중요 시설물 중의 하나인 발전소의 경우, 지진피해사례를 살펴보면 구조요소보다 비구조요소의 손상 및 파괴에 의한 피해가 많이 발생하고 있으

† Corresponding Author ; Member, Gangneung-Wonju National University, Professor

E-mail : woojung@gwnu.ac.kr

* Gangneung-Wonju National University, Student

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

A part of this paper was presented at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jong Kwan Ryu

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

며 이러한 비구조요소의 피해복구비용은 전체 피해복구비용 중 상당한 비중을 차지하고 있는 것으로 보고된 바 있다⁽²⁾. 이와 같이 최근 조사결과에 의하면 지진에 의해 발생한 건축물 피해의 70% 이상이 비구조적 요소에서 발생할 정도로 그 중요성이 부각되고 있으며, 이에 따라 인명손실과 사회적, 경제적 피해를 최소화하기 위하여 비구조요소의 지진거동을 분석하여 내진성능을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

지진 발생이 빈번한 국가들에서는 공공건물을 중심으로 중요 설비 및 기기에 대해 내진 성능을 확인하도록 규제를 강화하고 있다. 따라서 이와 같은 설비의 내진 성능검증은 설비 자체의 구조적 안전성뿐만 아니라 지진 발생 후 고유기능의 지속적 유지 여부 확인까지를 최종적인 검증 목표로 하고 있는데, 전자는 시험 및 해석적 방법 모두에 의해 검증이 가능한 것에 비하여 후자는 일반적으로 시험에 의한 검증이 효율적인 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾. 우리나라는 2019년 3월 개정된 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)⁽⁷⁾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⁽⁸⁾으로서 진동대 시험 또는 해석으로 기본적인 내진설계를 검증하도록 되어 있다.

이 연구에서는 실제 수력발전소에서 사용하였던 몰드변압기를 확보한 후 진동대 시험을 통하여 내진성능 평가를 수행하고자 하였다. 몰드변압기는 권선 부분을 에폭시수지로 굳혀 절연한 건식 변압기로 고정 및 지지를 위한 베이스 찬넬과 연결된 하부프레임, 고압코일과 고압코일을 고정하는 스페이서 등의 상부프레임으로 구성된다. 시험소에서는 정격전압에 대한 기능을 확인하기 어려우므로 일반적으로 도통시험에 의한 회로건전성 확인으로 기능의 연속성을 판단한다.

진동대 시험방법은 ICC-ES AC156을 참조하였으며, 건축물 내진설계기준과 내진설계기준 공통적용사항을⁽⁹⁾ 만족하도록 ICC-ES AC156 규격에 따라 요구 응답 스펙트럼(required response spectrum, RRS)과 인공지진파의 가속도시간이력을 작성하고 가속도 배율을 조정하여 적용하였다. 또한 경주지진과 포항지진의 기록을 입력지진동으로 하여 국내 기록지진에

대한 내진성능을 평가하고 지진거동특성을 분석하고자 하였다. 이에 따라 구조적 또는 기능적 손상이 발생할 때까지 입력지진동의 가속도배율을 조정하며 시험을 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 요구하고 있는 시험절차⁽¹⁰⁾에 따라 수행하고 있으며, IEC 62271-210에⁽¹¹⁾ 의하여 고전압 스위치기어에 대한 시험이 국내에서 수행된 바 있다. 원자력 발전소의 주요기기의 내진성능검증에는 IEEE Std 323⁽¹²⁾, IEEE Std 344⁽¹³⁾ 또는 IEEE Std 382⁽¹⁴⁾ 등의 기준이 적용된다. 국내에서는 전기, 전자 기기의 내진 시험방법의 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 원자력 발전소의 안전관련 기기의 경우 IEEE Std 323과 IEEE Std 344을 준용하여 원전안전관련설비 성능검증(원자력 안전법 시행규칙 총리령 제 1180호, 2015.7.21.)에 의거하여 진행되고 있다.

앞서 서술한 시험방법들 중 IEEE Std 344는 원자력 기기의 내진시험방법으로서 안전성 및 합리성이 입증된 시험방법이나 원자력 발전소 설계기준에 따르며 지나치게 보수적일 수 있다. IEEE Std 693은 변전 시설에 국한된 시험검증방법으로서 복잡하며 일반적인 시설 및 설비에 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. IEC60068-3-3은 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 대한전기 협회에서 수·화력 발전설비의 내진설계 기준을 마련하기 위한 노력이 수행되고 있으나 내진성능평가를 위한 시험평가 방법은 제안되지 않은 실정이다. 따라

서 이 연구에서는 수력발전소에 적용되는 몰드변압기의 내진성능평가를 위하여 가장 최근에 제안되었으며, 보편적으로 적용 가능하며 국내 내진설계기준들을 만족하는 지진하중의 제시가 가능한 ICC-ES의 AC 156의 시험방법을 선택하였다.

이 시험방법은 일반적인 비구조요소의 내진성능검증을 위한 것으로서 ASCE 7, IBC등의 설계기준과 FEMA 461⁽¹⁶⁾ 및 IEEE Std 344 등의 타 시험규격들을 참조하여 진동대 장비를 이용한 시험절차와 방법을 체계적으로 정리하여 제시하고 있다.

3. 진동대 시험

3.1 시험대상품 제원 및 설치

진동대 시험에 사용된 시험대상품은 현장 설치조건과 동일하거나 최대한 유사한 조건이 되도록 먼저

기초 콘크리트 슬래브를 진동대 바닥에 M30 고장력 볼트(10EA)를 사용하여 고정하고, 시험대상품을 기초 콘크리트 슬래브에 후설치 앵커(깊이 100 mm 이상, 4ea)를 사용하여 고정하였다. 시험에 사용된 몰드변압기의 구성 및 제원은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

시험대상품의 동적 응답을 측정하기 위하여 시험대상품의 중앙 상단 프레임, 상, 중, 하단 프레임에 3축 가속도계를 설치하였다. 진동대의 제어 결과를 확인하기 위하여 진동대 테이블에 3축 가속도계를 설치하였고, 시험대상품의 상대 변위 측정을 위하여 좌측 상단과 하단에 좌우(X), 전후(Y)로 총 4개의 와이어 변위계를 설치하였다. 콘크리트 슬래브와 체결되는 시험대상품 앵커볼트 부분의 인발력과 변형률을 측정하기 위한 링 타입 로드 셀 4개와 스트레인 게이지 8개를 설치하였다. 또한 진동대 시험 전/후에 회로 건전성을 확인하기 위한 기능검사를 도통시험(through test)으로 진행하였다. 각 계측기의 설치 위치 및 사진은 Fig. 2에 나타내었다.

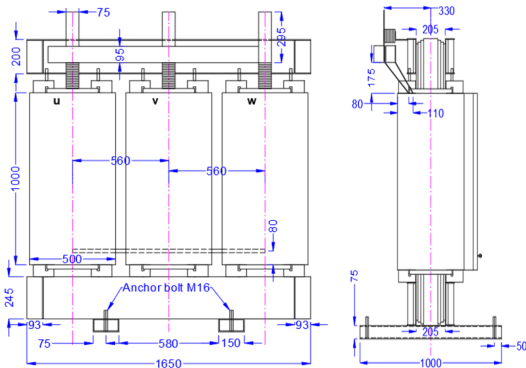


Fig. 1 Molded transformer specifications

Table 1 Tested specimen specifications

Specimen	Dimensions (mm)			Weight (kg)
	Length	Width	Height	
Molded transformer	1650	1000	1785	3404

3.2 진동대 입력지진

시험응답스펙트럼의 적합성을 평가하거나 시험 후 시스템의 변형 등을 측정하기 위하여 시험대상품의 고유진동수를 탐색하는 가진 시험을 실시하였다. 좌

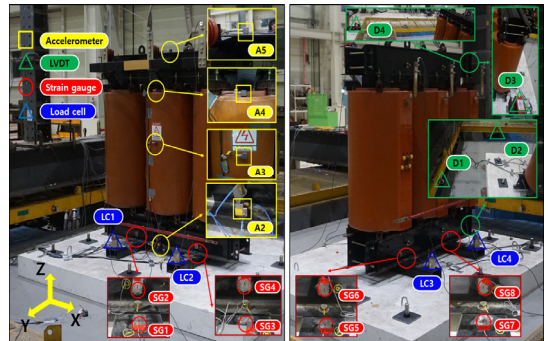


Fig. 2 Sensor location

Table 2 Seismic parameters for generating artificial seismic acceleration time history

Amplification of artificial earthquake [%]	Code	S_{DS}	z/h	A_{FLEX-H}	A_{RIG-H}	A_{FLEX-V}	A_{RIG-V}
50	-	0.275	1	0.44	0.33	0.18	0.07
100	KDS	0.55	1	0.88	0.66	0.36	0.14
125	-	0.688	1	1.10	0.83	0.45	0.18
150	Common application of seismic design criteria	0.825	1	1.32	0.99	0.55	0.22

우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향으로 단축 정현파 스위프 (2 oct./min, 0.05 g 이상)으로 진행하였으며, 가진 주파수의 범위는 1 Hz ~ 50 Hz으로 수행하였다.

진동대에 입력된 지진파형은 ICC-ES AC156 : 2015 응답스펙트럼의 조건에 부합하는 지진파 및 포항지진과 경주지진의 기록을 이용하였다. 본 시험에서 사용하는 인공지진과의 요구응답스펙트럼은 건축물 내진설계 기준(KSD 41 17 00 : 2019)과 내진설계 기준 공통적용사항을 바탕으로 작성하였다.

인공지진 가속도시간이력 생성을 위한 지진 매개 변수는 Table 2와 같으며 RRS(요구응답 스펙트럼)은 Fig. 3과 같다. 인공지진 가력 시 100 %와 150 %는 내진성능기준에 반드시 수행되도록 명시되어 있어 고려하였으며, 필요에 따라 가속도 배율 조절이 가능하기 때문에 50 %와 125 %를 추가적으로 수행하여 적용하였다. 식 (1)과 식 (2)는 ICC-ES AC156의 지진 매개 변수 계산을 위한 식이며, 식 (3)과 식 (4)는 수직방향의 지진 매개 변수 결정을 위한 식이다. Fig. 4는 작성된 인공지진(100 %)의 가속도시간이력과 응답스펙트럼의 비교를 나타낸다.

$$A_{FLX-H} = S_{DS}(1 + 0.6 \frac{z}{h}) \tag{1}$$

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

$$A_{FLX-V} = 0.67 \times S_{DS} \tag{3}$$

$$A_{RIG-V} = 0.27 \times S_{DS} \tag{4}$$

이 연구에서는 진동대 시험을 위한 입력지진동으로 국내에서 발생한 지진 중, 가장 피해가 컸던 경주

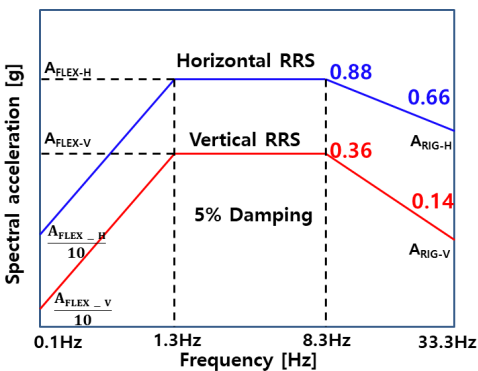


Fig. 3 ICC-ES AC156 RRS (PGA 100 %)

지진(PGA 0.43 g)과 포항지진(PGA 0.27 g)의 기록을 선택하였다. 우리나라 기록지진인 경주지진과 포항지

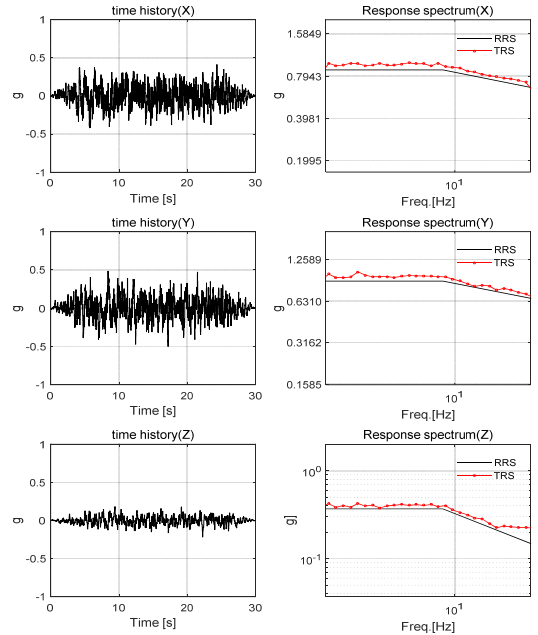


Fig. 4 Artificial seismic acceleration time history and response spectrum

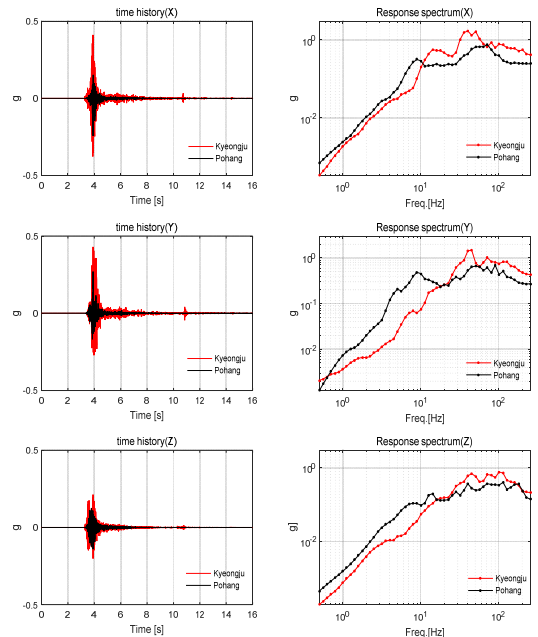


Fig. 5 Recorded seismic acceleration time history and response spectra for Kyungju and Pohang

진의 응답스펙트럼은 10 Hz 이상의 영역에서 높은 Sa값을 나타내고 있으며, 설계지진인 인공지진은 비

교적 낮은 1.3 Hz~8.3 Hz 구간에서 Sa값이 높게 나타나고 있음을 Fig. 5를 통하여 확인할 수 있다.


Table 3 Shaking table tests procedure

No.	Test name	Remarks
1	Inspection	Visual inspection
2	Function verification	Voltage check(on-off-on)
3	Resonance search test #1	Sinusoidal sweep, 2 Otc./min., 1 Hz - 50 Hz, 0.05 g
4	Kyungju (USN)	Tri-axial testing
5	Function verification	Voltage check(on-off-on)
6	Pohang (PHA2)	Tri-axial testing
7	Function verification	Voltage check(on-off-on)
8	Inspection	Visual inspection
9	Resonance search test #2	Sinusoidal sweep, 2 Otc./min., 1 Hz - 50 Hz, 0.05 g
10	Artificial earthquake 50 %	Multi-frequency seismic simulation tests, tri-axial testing, time duration 30 s, strong motion time duration 20 s
11	Artificial earthquake 100 %	
12	Artificial earthquake 125 %	
13	Artificial earthquake 150 %	
14	Inspection	Visual inspection
15	Function verification	Voltage check(on-off-on)

Table 4 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
Max. acceleration	± 3 g (bare table condition)

Table 5 Molded transformer damage classification

Test sequence	Record seismic		Artificial seismic (AC156)			
	Kyungju	Pohang	50 %	100 %	125 %	150 %
Remarks	-	-	-	Dropped bolts and washer	Dropped component	
Figure	-	-	-			

3.3 시험절차

시험절차는 Table 3과 같이 먼저 국내 기록지진인 경주 및 포항지진을 가진 한 후 Table 2의 인공지진을 가속도 증폭비 크기 순서대로 가진 하여 두 지진에 대한 결과를 비교하였다. 몰드변압기의 동특성을 확인하기 위하여 각 시험 전에 공진탐색시험을 수행하여 고유진동수를 측정하였다. 내진성능시험에 사용된 진동대는 부산대학교 지진방재연구센터가 보유하고 있는 6 자유도 진동대 장비(미국, MTS systems corporation)를 이용하여 수행하였으며 진동대 시스템의 규격 및 사양은 Table 4와 같다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 육안 및 기능검사

육안검사의 경우 각 시험의 전, 중, 후에 수행하여 기기의 구조적 건전성을 확인하였으며, 기능검사의 경우 진동대 시험 중 기기에 전류를 가하고 AC/DC 변환기를 이용하여 출력 전압을 계측하였다. 시험 전과 후에 입력 전원을 on-off-on 하여 계측 전압의 이상 유무를 바탕으로 기능적 건전성을 확인하였다.

Table 3의 순서에 의해 진동대 시험을 수행한 결과, 모든 시험절차에서 전기신호의 계측에 대한 기능적 손상이 발생되지 않아 전기적인 기능이 정상적으로 작동한 것으로 판단하였다. 구조적 손상의 경우 국내 기록 지진 모사 시험에서는 특이한 사항이 발견되지 않았지만 Table 5와 같이 인공 지진 모사 시험 100%에서 내부 변압기 부근의 볼트 2개 및 와셔 1개, 125%에서 구성품의 탈락이 발생하였다. 공진탐색 시험결과에서 언급하겠지만 기록 지진 모사 시험에서 몰드 변압기의 손상이 시작되어 그 여파가 다음 시험인 인

공 지진 시험에 영향을 끼친 것으로 판단된다. ICC-ES AC156에서는 하중을 받는 부재 또는 주요 연결 볼트 등 구조부재의 파손은 허용하지 않으므로 결과적으로 몰드 변압기에 구조적 이상이 발생한 것으로 간주하였다. 정확한 시험 및 결과 비교를 위해서는 정상적인 몰드 변압기 2기를 준비하여 각각 시험하는 것이 타당하지만 여건상 1기만 이용하여 연속적인 시험을 진행하여 발생한 결과라 판단된다.

4.2 공진탐색 시험

시험대상품의 공진은 공진검색시험 중 진동대에 입력된 가속도(base, *a*)에 대한 시험대상품 각 위치에서 응답가속도(Unit, *b*)의 전달함수를 식 (5)를 이용하여 결정하였다. 전달함수 (T_{ab})는 입력된 신호의 power spectral density(P_{aa})에 대한 입/출력신호의 cross power spectral density(P_{ba})에 의해 계산된다. 공진 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 신호는 대칭 해밍 창(symmetric hamming window)함수가 적용되었으며, 공진탐색시험 결과는 Table 6에 나타내었다.

$$T_{ab}(f) = \frac{P_{ab}(f)}{P_{aa}(f)} \tag{5}$$

Table 6과 같이 기록지진 모사 시험 전(#1)과 후(#2)를 비교해 보면 차이가 발생한 것을 알 수 있다.

X축의 경우 최대 6.9 %의 차이가 발생하였으며, Y축은 최대 8.3 %의 차이가 발생하였다. 이는 시험 가진 후 전기적 기능의 문제는 발생하지 않았으나, 구조적인 문제가 발생하기 시작한 것으로 판단된다.

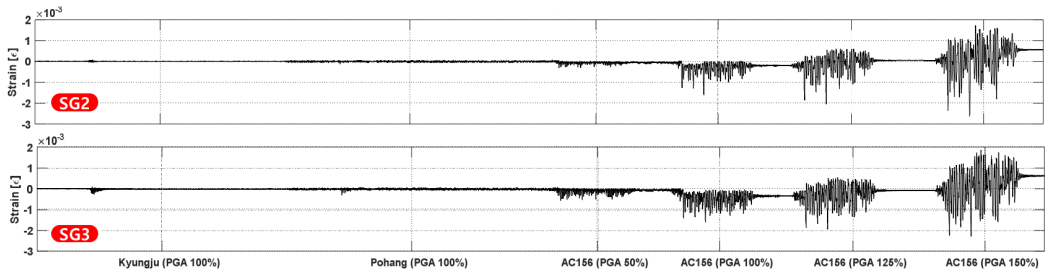
4.3 응답신호의 분석

Fig. 6은 모든 시험의 대표적인 응답신호들을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 6(a)은 몰드변압기의 하부 프레임과 콘크리트 슬래브에 앵커 고정되는 각관의 연결부에 각각 설치한 스트레인 게이지 중 가장 큰 응답(SG3)과 하부 프레임에 설치한 스트레인 게이지 중 가장 큰 응답(SG2)을 그래프로 표현한 것이다. Test 11(인공지진 100%)부터 영구변형이 발생하기 시작하며, Test 13(인공지진 150%)에서 0.0006의 누적변형률이 계측되었다.

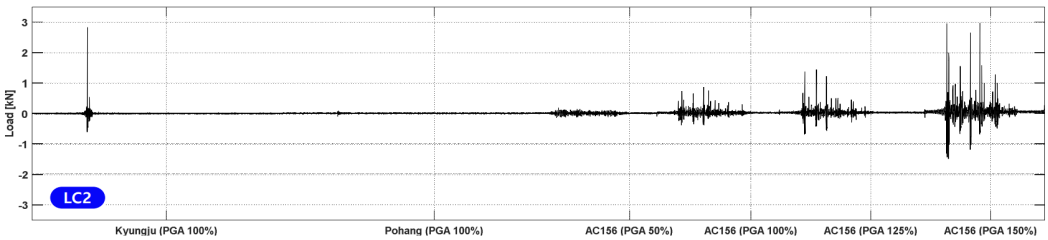
Fig. 6(b)은 계측된 앵커하중 중에서 가장 큰 신호를 그래프로 표현한 것이다. Test 13에서 앵커하중의 크기가 급격히 증가한다. 그러나 최대 하중은 2.97 kN 이하로 크지 않다. 여기서 경주지진의 앵커하중이 2.83 kN으로, Test 13의 경우를 제외하고 가장 크게 나타났다. 경주지진은 10 Hz이상의 비교적 높은 진동

Table 6 Results of the resonance search test

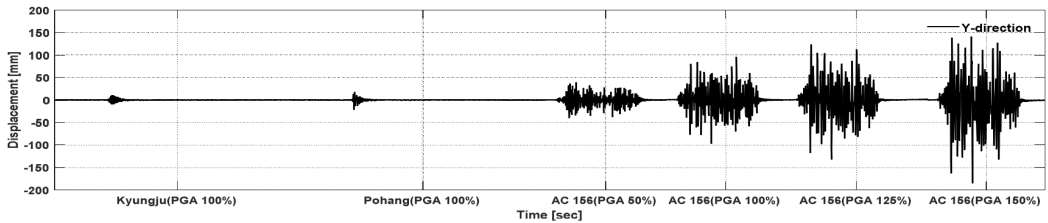
Case	Sensor location	Natural frequency, df = 0.25 Hz		Case	Sensor location	Natural frequency, df = 0.25 Hz	
		Axis direction	Results			Axis direction	Results
#1	Bottom frame (A2)	X	7.50 Hz	#2	Bottom frame (A2)	X	7.25 Hz
		Y	15.50 Hz			Y	15.50 Hz
		Z	25.00 Hz			Z	24.50 Hz
	Center (A3)	X	7.75 Hz		Center (A3)	X	7.25 Hz
		Y	3.00 Hz			Y	2.75 Hz
		Z	25.00 Hz			Z	24.50 Hz
	Top of center (A4)	X	7.75 Hz		Top of center (A4)	X	7.25 Hz
		Y	3.00 Hz			Y	2.75 Hz
		Z	25.00 Hz			Z	24.50 Hz
	Top frame (A5)	X	7.75 Hz		Top frame (A5)	X	7.25 Hz
		Y	3.00 Hz			Y	2.75 Hz
		Z	25.00 Hz			Z	24.50 Hz



(a) Strain response at SG2 and SG3



(b) Response of anchorage load at LC2



(c) Relative displacement between top and bottom frame

Fig. 6 Test response signals representatively

수 영역에서 응답스펙트럼의 값이 크게 나타나는 대표적인 고진동수 지진이다. Fig. 6(b)의 결과로부터 고진동수 지진의 경우 앵커볼트에 작용하는 하중이 크게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 상부 프레임과 하부프레임의 전후방향(Y축) 상대변위를 그래프로 표시한 것이다. 경주지진과 포항지진의 경우 상대변위는 21.92 mm으로 상당히 작다. Test 11에서 최대 상대변위는 97.26 mm이며 Test 13에서의 최대 상대변위는 185.47 mm이다. 즉, Test 11의 상대변위는 두 계측지점 사이 거리의 7% 이상이며, Test 13은 10% 이상이다. 따라서 입력지진동의 크기가 커질수록 상부 프레임과 하부프레임의 상대변위는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 국내의 방송통신설비의 내진시험방법에서는 단방향 변위 폭이 75 mm를 초과할 경우 시험대상설비에 문제가 발생한 것으로 간주한다. 몰드변압기의 상대변위는 건축물 내진설계 기준에 의거한 인공지진 100% 부터 이를 초과한다.

Fig. 7은 각 지진모사 시험 중 가속도계에서 계측된 가속도시간이력의 최대값을 높이에 따라 정리한 것이다. 경주지진의 경우 하부프레임에서 계측된 최대 가속도 값이 가장 크게 나타났다. 인공지진의 경우에도 Test 10(인공지진 50%)을 제외하고 모두 하부프레임에서 가속도 응답이 크게 나타났으며, 고압 및 저압 코일이 있는 무게중심 위치에서 최대 가속도 값이 작게 나타났다. 이 시험에서 입력지진동으로 사용한 경주지진의 PGA는 0.45 g이다. Fig. 7에서 ZPA가 0.66 g 이상인 가속도 배율 100% 이상의 인공지진에 대하여 몰드변압기 하부프레임의 가속도응답이 크게 계측되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 유연한 하부 프레임을 가지는 시험대상은 강진에 의해 하부에서 계측되는 응답가속도가 크며 하부프레임의 유연한 비선형거동으로 상부에서 계측되는 최대 가속도응답은 크지 않은 것으로 유추한다. 100%와 125%의 상부 가속도 응답의 크기가 다른 것은 100% 가진

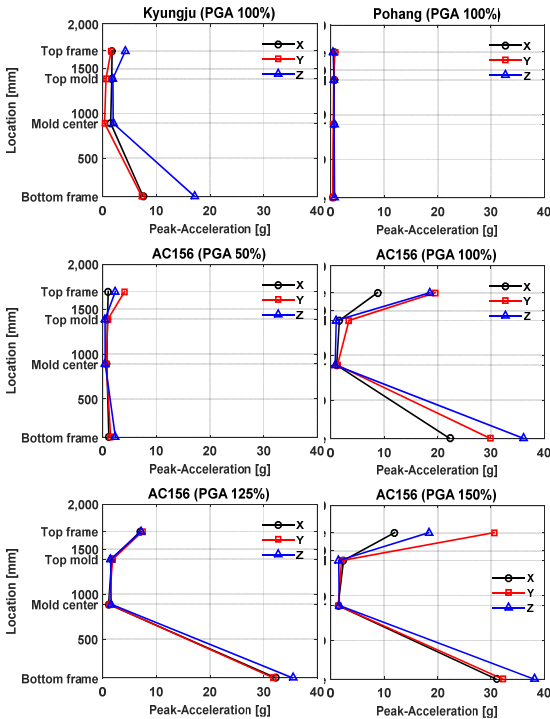


Fig. 7 Test response signals for each sensor

시부터 발생하는 볼트 풀림 등의 구조적 손상으로 인한 기기 상부의 구조적 특성 변화가 주요 원인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 Test 13의 가속도응답으로부터 구한 전달함수이다. 왼쪽은 전달함수 각 가속도계 위치에서의 전달함수를 나타낸 것이다. 검은색 점선으로 표시된 하부 프레임에서의 전달함수가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 오른쪽 그림은 전달함수를 10 Hz 구간으로 나누어 RMS값으로 표현한 것이다. 전달함수의 증폭비율을 평균적으로 계산하기 위하여 가속도응답의 진동전달함수를 10 Hz 구간 간격에 대한 RMS 값으로 정리하였다. 식 (6)은 RMS값을 계산하기 위한 식이며 여기서 H 는 진동전달 함수 값이다⁽¹⁷⁾.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n|^2} \tag{6}$$

Fig. 8의 오른쪽 그림에서, 수평 방향(X, Y)에 대하여 10 Hz를 초과하면서 하부 프레임의 전달함수의 RMS 값이 크게 나타나기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 30 Hz 이상의 진동수 영역에서 하부프레임의

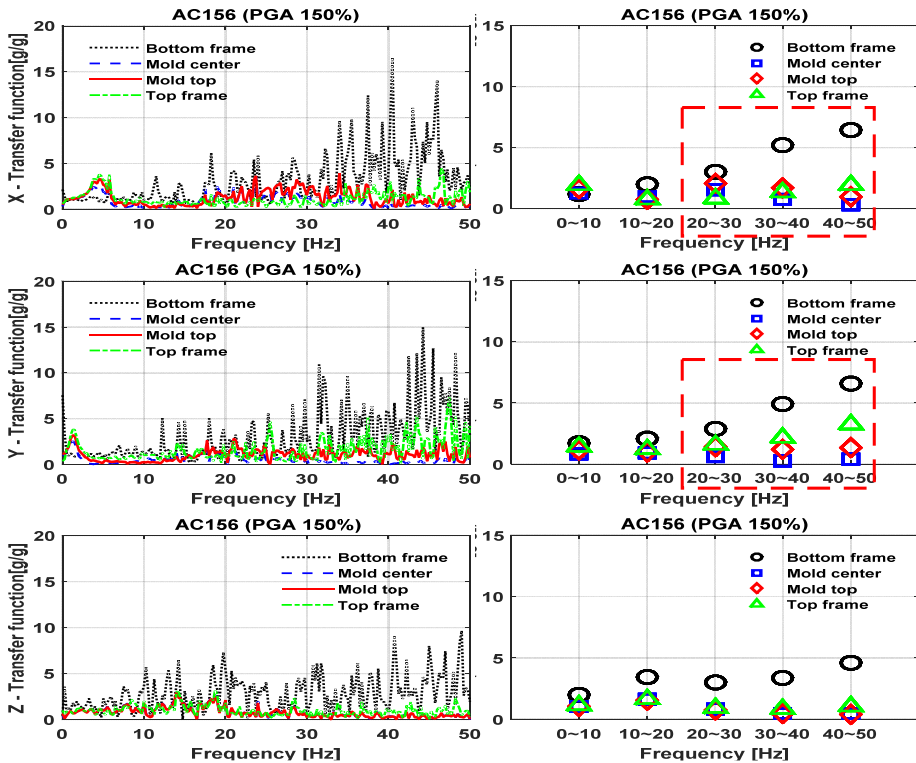


Fig. 8 Transfer function of acceleration responses and RMS values of transfer functions in the 10 Hz ranges

전달합수 RMS 값이 다른 위치에서의 응답과 비교하여 상당히 크게 나타나기 시작하며 40 Hz 이상의 고진동수 영역에서 진동전달합수 RMS 값이 가장 크다. 수직방향(Z)의 경우 모든 주파수 영역에서 하부 프레임의 진동 전달합수 RMS 값이 크다. 이와 같이 몰드 변압기의 진동대 시험 응답 신호를 측정된 결과, 유연한 하부프레임으로 인한 연성거동으로 인하여 상부로 전달되는 지진동이 저감되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 실제 수력발전소에서 사용되었던 몰드 변압기를 ICC-ES AC 156에서 제안된 절차에 따라 건축물 내진설계기준 및 내진설계기준 공통적용사항을 만족하는 인공지진을 작성하고 가속도 배율을 조절하여 진동대 시험을 수행하였다. 또한 최근 피해가 가장 큰 경주지진과 포항지진의 기록을 입력지진동으로 선택하여 국내 기록지진에 대한 지진동 특성을 분석하고자 하였다.

(1) 모든 시험절차에 대하여 몰드 변압기의 기능적 이상 및 손상은 없었으나 125% 가진 시 부품이 몰드에 낙하하여 기능 손상의 유발 가능성을 확인하였다. 기록지진 모사 시험 후부터 공진점의 진동수가 저하되었으므로 구조적 손상이 발생하기 시작한 것으로 판단된다.

(2) 건축물 내진설계기준에 해당하는 인공지진 100% (test 11) 가진 시부터 육안검사로 구조적 손상이 확인되었으며 몰드변압기의 지지부에서 영구변형이 발생한 것으로 판단된다. 내진설계기준 공통적용사항의 최대설계지진에 해당하는 인공지진 150%(test 13)에서 0.0006의 누적변형률이 관찰되었다. 이는 몰드변압기의 무거운 상부구조와 그에 따른 높은 무게중심, 그리고 상대적으로 하중이 작고 연성이 큰 하부 프레임의 구조적 특성으로 인하여 발생된 비선형적인 거동이 원인인 것으로 판단된다. 이러한 비선형 거동에 의하여 발생하는 상, 하부의 큰 상대변위는 주변기와 충돌 또는 영향설비 등의 손상을 유발할 수 있음⁽¹⁸⁾으로 반드시 억제되어야 할 것이다.

(3) 몰드변압기의 상부와 하부의 상대변위는 인공지진 100%(test 11)에서 단방향 변위 폭이 75 mm를 초과하여 방송통신설비의 내진시험방법에서 제시하는 변위한계를 초과하였다. 따라서 몰드변압기의 상

대변위를 억제하기 위한 적절한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 앵커에 전달되는 하중의 경우 가속도배율이 높을수록 증가되는 경향이 나타났다. 그러나 최대 하중은 2.97 kN으로 높지 않으며, 이는 지지부의 비선형 거동에 의하여 상부의 하중이 앵커에 전달되기 전에 소산되는 것으로 판단된다. 또한 국내에서 발생한 대표적인 고진동수 지진인 경주지진에서 2.83 kN의 앵커하중이 계측되었다. 이는 내진설계기준 공통적용사항에 기반한 인공지진 150%(test 13)의 경우를 제외하고 가장 높은 하중이다. 시험결과로부터 진동수가 높은 지진 하에서 고정부 앵커볼트에 작용되는 하중이 크게 나타날 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 고진동수 지진으로 앵커볼트에 작용하는 하중특성을 검토해 볼 필요가 있다.

이 연구 결과를 바탕으로 발전소의 중요 설비 중 하나인 몰드 변압기의 내진보강 대책 수립 및 몰드변압기의 내진보강을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(201FIP-B128598-04)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, Journal of KSNVE, Vol. 28, No. 3, pp. 12~19.
- (3) Lee, S. M. and Jung, W. Y., 2020, Evaluation of Anchorage Performance of the Switchboard Cabinet under Seismic Loading Condition, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 1~12.
- (4) 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.

(5) Moon, J.-Y., Kwon, M.-H., Kim, J.-S. and Lim, J.-H., 2018, Seismic Fragility Evaluation of Cabinet Panel by Nonlinear Time History Analysis, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 2, pp. 50-55.

(6) Jung, W. Y. et al., 2018, Shaking Table Test Examples for Seismic Performance Evaluation of Nonstructural Components, Journal of KSNVE, Vol. 28, No. 3, pp. 20-26.

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

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

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

(10) IEEE 693, 2005, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations.

(11) International Electronic 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.

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

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

(14) The 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 Electronic Commission, 1991, Environmental testing - Part 3-3: Guidance - Seismic test methods for equipments, IEC 60068-3-3.

(16) Federal Emergency Management Agency, 2007, FEMA Report 461, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of

Structural and Nonstructural Components, Federal Emergency Management Agency.

(17) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003, Standard on Transitions, Pulses, and Related Wave Forms, IEEE Std 181.

(18) 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 of Noise and Vibration Engineerings, Vol. 29, No. 6, pp. 770-779.



Sang-Moon Lee received his Master degree from Gangneung-Wonju National University with the topic related with evaluation of the applicability of reinforced concrete beams using FRP. He is currently a Ph.D. student at the Department of Civil Engineering of Gangneung-Wonju National University.



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 pressured piping system.



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.