

진동시험에 의한 154kV 변압기 부상의 동특성 분석 및 내진성능 평가

Modal Identification and Seismic Performance Evaluation of 154kV Transformer Porcelain Bushing by Vibration Test

조양희¹⁾ · 조성국²⁾

Joe, Yang-Hee · Cho, Sung-Gook

국문 요약 >> 지진과 같은 재난이 발생하였을 때에도 전력설비는 그 본래의 기능을 상실하지 않고 구조적인 안정성을 유지해야 하는 핵심 산업시설물이다. 이 연구는 가장 대표적인 전력설비인 154kV 변압기에 부착된 애자형 부상의 진동특성과 내진성능을 분석하였다. 연구의 목적에 따라 국내에서 운용하던 실제 154kV 변압기 부상을 대상으로 30tonf 용량의 진동대를 이용하여 진동시험이 실시되었다. 진동시험은 동특성분석시험과 내진성능시험 그리고 파괴한도시험으로 구분하고, 각각의 시험에는 정현소인파, 인공지진파 그리고 연속공진정현파를 진동대운동으로 입력하였다. 이 논문에는 시험에 사용된 시편과 진동설비의 특성 그리고, 시험 방법 및 종류를 설명하고, 시험 결과 얻어진 측정자료의 특성에 대하여 논의한다. 이 연구를 통하여 국내에서 운용중인 154kV 변압기 부상은 그 고유진동수가 20Hz 이상인 고진동수 설비이며, 감쇠비는 4% 미만인 것으로 분석되었다. 또한, 특별한 경우를 제외하고, 변압기 부상은 국내의 설계기준지진에 대하여 충분한 내진안전성을 보유하고 있으며, 강한 공진운동에 의해 예상되는 부상의 최초 파괴모드는 하단 개스킷의 파손인 것으로 밝혀졌다.

주요어 전력설비, 변압기 부상, 진동특성, 내진성능, 진동시험, 동특성분석, 고유진동수, 감쇠비, 파괴모드

ABSTRACT >> The power supply system is one of the most important infrastructures which should maintain their inherent function during and after earthquakes. This study was performed to analyze dynamic characteristics and seismic performance of Korean typical 154kV transformer porcelain bushing. For the purpose of this study, actual 154kV porcelain bushings were selected and tested on the shaking table. The vibration tests consist of modal identification tests, seismic performance tests, and fragility tests. The sine sweep waves, artificial earthquake waves, and continuous resonant sine waves were used as shaking table motions. This paper describes the test specimens, shaking facilities, and test methods. Natural frequencies and damping ratios of the bushing have been evaluated from the experimental data. The failure mode and the performance level of the Korean transformer bushing have been first identified in this study.

Key words power supply system, transformer bushing, dynamic property, seismic performance, vibration test, modal identification, vibration frequency, damping ratio, failure mode

1. 서론

국가의 기간시설 중에서도 전력시설은 자연 재난이나, 사회의 위기 상황에서도 그 본래의 기능을 유지해야 하는 매우 중요한 시설물이다. 또, 전력시설을 구성하는 각종 설비 중에서도 특히 송변전설비는 발전소로부터 일반 전력 수요

자에 이르는 전 구간에서 전력을 공급하고 배분하는 역할을 담당하므로, 수량과 종류가 매우 많고, 설치된 장소도 한반도 전역에 고르게 분포되어 있다. 2002년 12월에 조사된 자료¹⁾(표 1 참조)에 의하면, 스위치야드를 포함하여 국내에서 운용중인 변전소는 총 500여 곳이 넘는다. 이처럼 광범위한 분포 지역과 방대한 수량을 근거로 설비 자체의 설치 및 운용에 투입되는 예산의 규모를 고려하면, 송변전설비의 중요성과 가치는 더욱 높게 평가된다. 아울러, 지진에 의한 자연 재난이 발생하여도 신속한 사회 안정과 재건 사업을 시행하기 위해서는 필수적으로 전력이 공급되어야 하기 때문에 송변전설비의 내진안전성은 무엇보다 중요한 과제로 받아들

¹⁾ 정회원·인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수
(대표저자: yhjoe@incheon.ac.kr)

²⁾ 정회원·인천대학교 공학기술연구소, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 8. 25 / 심사종료일 : 2006. 9. 11)

〈표 1〉 국내 변전소 운용 현황

용량, kV (취급 전압)	사업소, 개소
22.9	10 (2)
66	20 (1)
154	472 (21)
345	69 (22)
765	3 (1)
합 계	574 (47)

주) 2002년 12월 기준 자료임.

() 안의 수치는 스위치야드 현황임.

여겨야 한다.

국내 이외의 지진이 빈번한 국가에서는 송변전설비에 대한 내진설계기술과 내진성능평가기술을 개발하기 위하여 많은 연구를 진행하고 있으며, 각국의 특성에 맞는 산업기준과 기술기준^(2,3)을 마련하고 있다. 국내에서도 1995년에 자연재해대책법을 설정하고, 송변전설비에 적용할 수 있는 별도의 내진설계기준을 제정하기 위한 연구⁽⁴⁾를 진행하였다. 이 연구 성과를 근간으로 2003년도에는 전력설비의 운용 주체인 한국전력공사에서 송변전설비의 내진설계를 위한 실무지침서⁽⁵⁾를 발간하였다. 또, 최근에는 건설 당시에 내진설계가 고려되지 않고 상업 운전 중이던 송변전설비에 대한 내진성능평가기술을 개발하기 위한 연구⁽¹⁾도 수행되었다.

일반적으로 구조물의 내진설계 혹은 내진성능평가를 진행하기 위해서는 우선적으로 대상 시설물의 동특성분석 과정이 필요하다. 구조물 혹은 일반 산업시설물들의 동특성은 주로 해석에 의한 방법으로 간편하게 분석된다. 그러나 송변전설비와 같이 변전소에 설치되는 기기류의 설비들은 그 특성상 해석모델의 작성에 많은 제약이 따른다. 따라서 이들의 진동특성분석과 내진성능평가에는 주로 시험에 의한 방법이 동원된다. 1990년대 이전까지 국내외에서 송변전설비에 대한 동특성분석 혹은 진동분석에 관한 실험적 연구 실적은 미진한 수준이었다. 그러나 1994년 미국의 Northridge 지진과 1995년 일본의 Kobe 지진(효고현 남부 지진) 발생 때 송변전설비가 큰 피해를 입은 이후로 미국의 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)에서는 변압기 부싱 등을 대상으로 송변전설비의 종류별로 많은 내진성능 시험⁽⁶⁻⁸⁾을 수행하고 있다. 반면에 국내에서는 현재까지 송변전설비에 대한 내진성능시험 혹은 진동시험을 수행한 실적이 전혀 없다.

이 연구는 국내 최초로 송변전설비의 진동특성과 내진성능을 분석하기 위하여 계획되었다. 국내의 여러 송변전설비 중에서도 가장 중요도가 높고, 대표적인 설비이면서 수량이 가장 많은 설비는 154kV 변압기라 할 수 있다. 이 사실을

감안하여 이 연구에서는 다른 전력설비보다 변압기를 우선 분석 대상으로 선정하고, 그동안 국내 변전소에 설치되어 실제 운용 중이던 154kV 변압기의 부싱을 대상으로 진동대(shaking table)를 이용한 진동시험을 실시하였다. 이 논문은 이 연구에서 수행한 시험의 종류와 방법에 대하여 설명하고, 시험으로부터 얻어진 부싱의 주요 위치에서 계측된 가속도 응답 신호와 입력진동 신호에 대하여 논의한다. 또, 이 논문은 계측신호의 분석방법 및 분석결과를 설명한 후, 국내 변압기 부싱의 동특성과 내진성능수준을 분석한다.

2. 진동대시험

2.1 시험체

과거 발생된 지진피해분석보고⁽¹⁾에 의하면, 지진으로 인한 변압기의 파괴 유형은 기기 자체의 전도 혹은 활동과 같은 안정성 상실이거나, 탑재된 애자의 파손이다. 변압기 본체는 고유진동수가 높고 역학적 강도가 크기 때문에 지진에 의한 동적 증폭이 적고 내진 안전성도 우수하다. 반면에 탑재된 애자의 파손은 절연 기능의 상실을 초래하므로 변압기의 파손을 의미한다. 또 변압기는 송변전설비 중에서도 가장 큰 중량물로서 변압기 전체를 시험하기 위해서는 1,200kN 이상의 중량물을 가진할 수 있는 대형 진동설비가 필요하다.

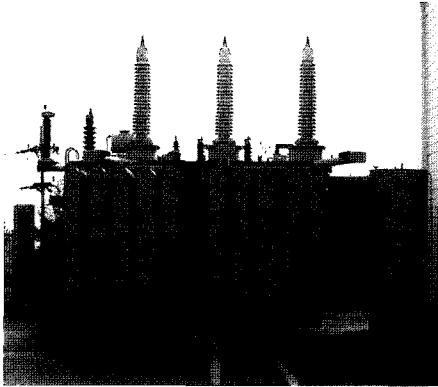
이런 사실을 감안하여, 이 연구에서 분석대상으로 선정한 시험체는 그 동안 국내 서산변전소에서 실제 운용 중이던 154kV 변압기의 상단에 탑재된 애자형 부싱(porcelain bushing)이다. 그림 1과 그림 2는 154kV 변압기의 전체 형상으로서 부싱 상단에 연결되는 전선을 제거한 모습이다. 그림에서 변압기 상단에 보이는 주름진 실린더 형태의 기둥이 애자형 부싱으로서 이 연구의 대상 시험체이다.

변압기 외함의 재질은 KSD 3503의 제2종 SS41 강재이며, 부싱의 주요 재질은 세라믹(ceramic)이다.⁽⁹⁾ 변압기와 부싱의 크기와 중량은 표 2에 보인 바와 같다. 부싱은 변압기 본체의 상단에서 약 185cm가 대기에 노출되어 있고, 약 125cm 길이의 부싱 하부 몸체는 변압기 속으로 인입되어 있다. 변압기에 인입되는 부싱 하부 몸체의 형상은 그림 3에서 확인할 수 있다. 그림 4는 이 시험을 위하여 특별히 제작된 강제 고정구(fixture)에 연결되어 진동대 상단에 정착된 부싱의 모습이다.

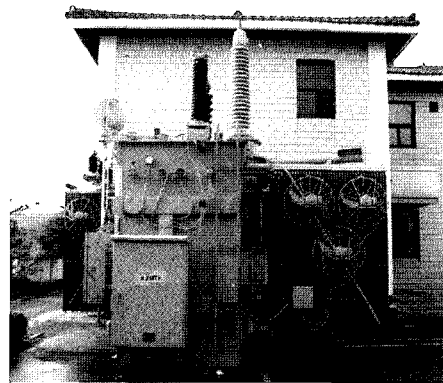
실제 현장에 설치되는 변압기의 부싱은 외부로부터 부싱 상단으로 굽은 동연선(copper strand) 전선이 연결된다. 이 연구를 위한 시험에서는 실제 현장상태와 유사하게 상단에 전선을 연결한 부싱을 ‘기본모델’(전선연결모델)로 사용하

〈표 2〉 시험체의 크기 및 중량

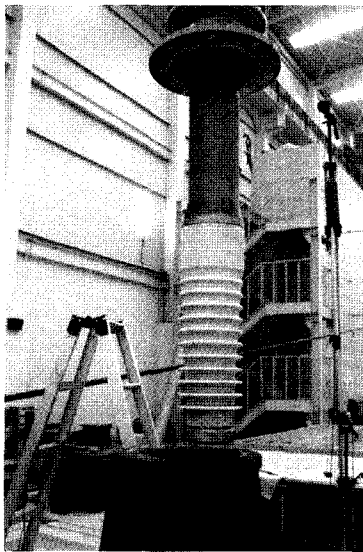
설비	제원	총중량	크기 (m)	비고
변압기		약 1180kN	7.5×5.6×5.73 (가로×세로×높이)	오일 중량(약 245kN) 포함
부싱		약 980N	상부 몸체: 0.31×1.85 (외경×높이) 하부 몸체: 0.15×1.25 (외경×높이)	절연유 포함 중량



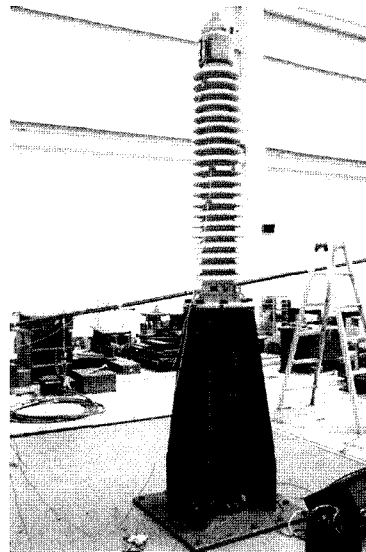
〈그림 1〉 154kV 변압기의 정면 형상



〈그림 2〉 154kV 변압기의 측면 형상



〈그림 3〉 변압기에 인입되는 부싱의 하부 몸체 형상



〈그림 4〉 특별 제작된 강제 고정구에 설치된 부싱의 형상

였으며, 전선 연결 상태의 영향을 파악하기 위하여 상부의 전선을 제거한 부싱을 ‘비교모델’(전선제거모델)로 사용하였다.

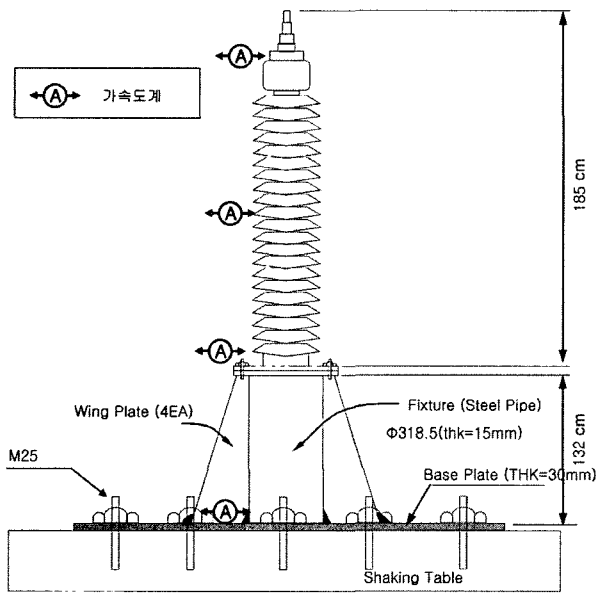
2.2 진동설비 및 계측기

시험에 사용된 진동설비는 현대기술연구소가 보유한 수평 1축 방향으로 진동운동이 가능한 진동대로서 약 295kN (약 30tonf)의 시편이 장착되었을 때, 1.0g의 가속도로 가진할 수 있다. 이 진동대의 최대 변위와 속도는 각각 100mm와 50cm/sec이며, 가진 진동수 성능은 약 50Hz이다.

진동시험을 위하여 부싱은 강제 고정구에 실제와 동일한

볼트로 고정하였고, 강제 고정구는 다시 진동대에 16개의 M25 고장력 볼트로 고정하였다. 강제 고정구는 고유진동수가 50Hz 이상이 되도록 부재 치수와 두께를 설계하고, 시험 전에 예비시험을 통하여 고정구 자체의 동적 증폭이 없음을 확인하였다.

이 연구에서 계측한 부싱의 진동응답은 가속도 신호로서 부싱의 상단, 중단 및 하단에서 계측하였다. 그리고 강제 고정구의 하단에도 가속도계를 설치하고, 실제 부싱에 입력되는 진동운동을 기록하였다. 시험체에 부착한 가속도계의 위치와 강제 고정구의 치수는 그림 5에서 확인할 수 있다.

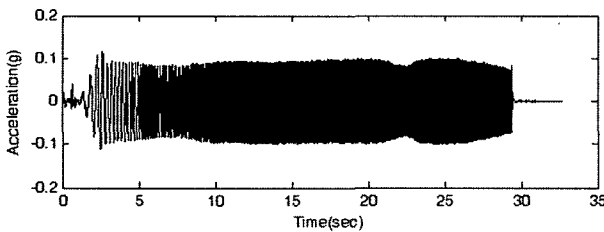


〈그림 5〉 시험체에 설치한 가속도계의 위치

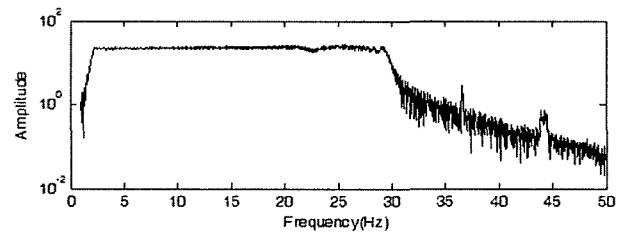
2.3 시험의 종류 및 입력운동

이 연구에서 수행한 진동시험은 동특성분석시험, 내진성능시험, 파괴한도시험의 세 가지로 구분된다. 각 시험에 사용된 입력운동의 종류와 특성을 표 3에 정리하였다.

동특성분석시험은 부싱의 고유진동수와 모드감쇠비를 결정하기 위한 것으로 최대진폭 0.1g인 정현소인파(sine sweep wave)를 입력운동으로 사용하였다. 이어진 내진성능시험에서는 국내의 변압기 부싱이 국내 내진설계기준에서 요구하는 내진성능을 보유하고 있는지의 여부를 판별하기 위한 시험으로서 설계응답스펙트럼의 5% 감쇠곡선에 부합하는 인공지진을 생성한 후, 이를 진동대운동으로 사용하였다. 그리고 파괴한도시험은 시편의 고유진동수와 동일한 진동수의 정현파를 연속적으로 반복하는 연속공진정현파(continuous resonant sine wave)를 입력운동으로 사용하였다.

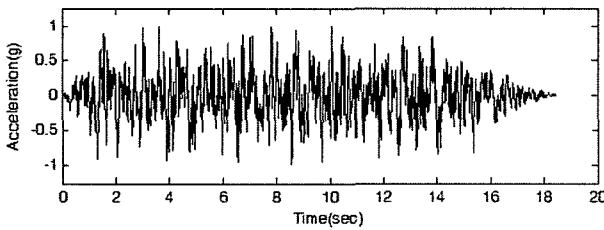


(a) 가속도 시간이력

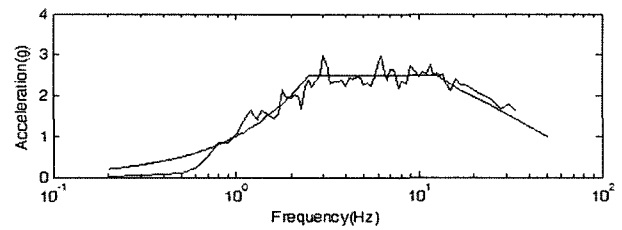


(b) 진동수함수

〈그림 6〉 동특성분석시험에 사용된 정현소인파 진동대운동(0.1g)



(a) 가속도 시간이력

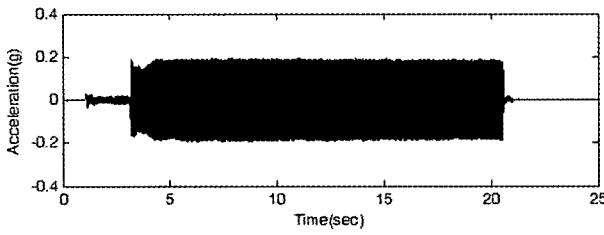


(b) 응답스펙트럼

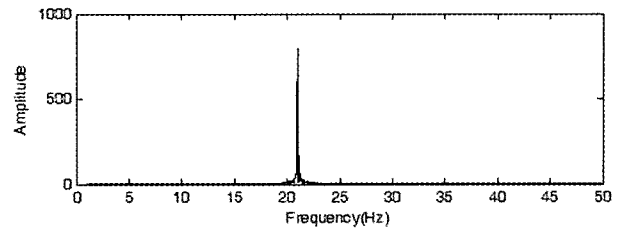
〈그림 7〉 내진성능시험에 사용된 인공지진파 진동대운동(1.0g)

〈표 3〉 부싱의 진동시험 종류와 입력운동의 특성

시험 종류	진동대운동	파형	특성
동특성분석시험 (modal identification test)		정현소인파 (sine sweep wave)	<ul style="list-style-type: none"> · 최대 진폭 : 0.1g · 진동수 변화 : 1 Octave/min · 진동수 범위 : 1 ~ 30Hz
내진성능시험 (seismic performance test)		인공지진파 (artificial earthquake wave)	<ul style="list-style-type: none"> · 설계응답스펙트럼 포괄 운동 · 지반종류 : S_B · 감쇠비 : 5% · 최대지반가속도 : 0.2g ~ 1.0g · 지속시간 : 18.5sec(Δt=0.005sec)
파괴한도시험 (seismic fragility test)		연속공진정현파 (continuous resonant sine wave)	<ul style="list-style-type: none"> · 가진진동수 : 21.8Hz · 최대진폭 : 0.2g ~ 1.0g · 지속시간 : 20sec ~ 30sec



(a) 가속도 시간이력



(b) 진동수합수

〈그림 8〉 파괴한도시험에 사용된 연속공진정현파 진동대운동(0.2g)

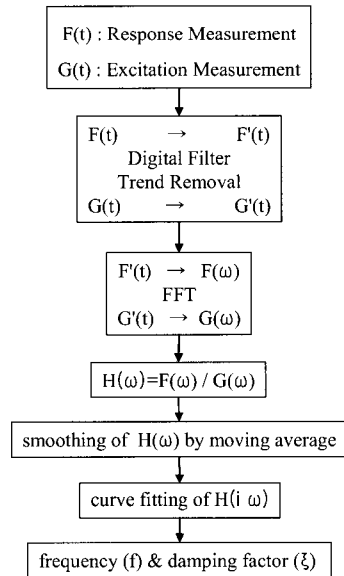
그림 6은 동특성분석시험에 사용된 진동대운동신호로서 2Hz~30Hz의 대역통과필터(band pass filter)를 통과한 후, 기준선 편향이 보정된 정현소인파의 가속도시간이력과 그의 진동수합수이다. 그림 7은 최대가속도가 1.0g로 정규화된 인공지진의 가속도 시간이력과 그의 응답스펙트럼 형태로서 내진성능시험의 진동대운동이다. 파괴한도시험에 사용된 연속공진정현파의 가진진동수는 앞선 동특성분석시험에서 분석된 결과를 바탕으로 부싱의 고유진동수와 일치하는 21.8Hz로 정하였으며, 진폭은 최초 0.2g에서부터 1.0g까지 0.2g씩 단계별로 증가시켰다. 그림 8은 파괴한도시험에 사용된 연속공진정현파의 시간이력 형태와 그의 진동수합수로서 대표적으로 0.2g의 입력운동을 보인 것이다.

3. 시험결과분석

변압기 부싱은 축대칭 원형 구조로서 변압기 본체의 영향을 배제하면, 부싱 자체의 동특성은 수평 두 방향으로 동일하다. 그리고 부싱 재료의 역학적 특성상 수직방향으로는 매우 큰 진동성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 연구에서는 부싱의 수평방향 거동 분석에 중점을 두고, 부싱의 최상단과 중간 높이의 수평 응답의 가속도신호와 진동대운동의 가속도신호를 분석하였다.

3.1 신호처리 및 분석 방법

일반적으로 진동시험에서 기록한 계측신호에는 여러 가지 원인에 의하여 오차가 포함되기도 하고, 기준선의 왜곡이나 편향(bias) 등이 발생할 수 있다. 계측신호의 오차는 기준선보정(base-line correction)과 필터링(filtering) 등의 신호처리 작업을 통하여 제거된다. 또, 계측신호로부터 구조물의 동특성을 추출하기 위해서 가장 일반적으로 적용하는 방법은 진동수응답함수(frequency response function)를 분석하는 방법이다. 이 연구에서는 부싱의 진동응답을 추출하기 위해서 그림 9에 보인 과정을 거쳐 계측신호의 진동수응답함수를 분석하였다.



〈그림 9〉 계측신호의 분석 과정

이때, 계측신호의 기준선보정(base-line correction) 작업은 다음 식 (1)과 같은 최소자승법⁽¹⁰⁾을 적용하였다.

$$\ddot{a}_1(t) = \ddot{a}_0(t) - (C_1 t + C_0) \quad (1)$$

식 (1)은 시간 t 의 함수로서 $\ddot{a}_0(t)$ 는 최초 기록된 가속도 시간이력함수이고, $\ddot{a}_1(t)$ 는 보정된 시간이력함수이다. 최소자승법의 선형 회귀에 사용되는 상수 C_0 과 C_1 는 다음 식으로 계산된다.

$$C_0 = \frac{2(2n+1) \sum_{t=1}^n \ddot{a}_0(t) - 6 \sum_{t=1}^n t \ddot{a}_0(t)}{n(n-1)} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{12 \sum_{t=1}^n t \ddot{a}_0(t) - 6(n+1) \sum_{t=1}^n \ddot{a}_0(t)}{n(n-1)(n+1)\delta t} \quad (3)$$

여기서, δt 와 n 은 함수의 시간증분과 시간간격의 총 수이다.

기준선 보정 과정을 통과한 계측신호는 대역통과필터(band pass filter)에 통과시킨 후, 진동수합수로 전환하였다.

이 연구에서 적용한 대역통과필터의 진동수 대역은 2Hz~30Hz이고, 디지털 필터는 6차 Butterworth Filter⁽¹¹⁾이다. 동특성분석에 이용한 전달함수는 진동수 간격의 10배에 해당하는 구간에서 이동평균법에 의해 평활화(smoothing) 하였다.

진동수응답함수로부터 시험체의 고유진동수와 모드감쇠비를 추출하기 위하여 적용된 방법은 다항식회귀분석기법 (polynomial curve fitting method)⁽¹²⁾이다. 이 방법에서 진동수응답함수의 허수부는 다음 식 (4)와 같은 다항식으로 전개된다.

$$H(i\omega) = \frac{(r2_k\sigma_k + r1_k\omega_k + ir2_k\omega)}{\sigma_k^2 + \omega_k^2 + 2i\sigma_k\omega} + A0 + A1(i\omega) + A2(-\omega^2) \tag{4}$$

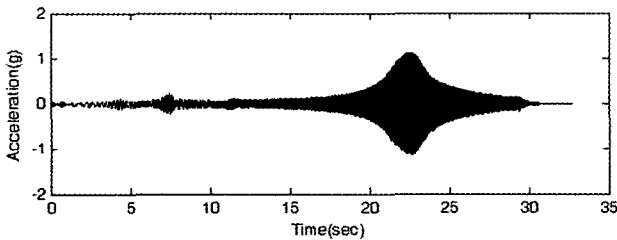
여기서, 구하고자 하는 모드진동수와 모드감쇠비는 각각 ω_k 와 σ_k 이고, $r_k = r1_k + ir2_k$ 는 복소유수(complex residue)이다. 그리고 $A0, A1, A2$ 는 회귀분석과정에서 구해지는 유수함수상수(residue function constant)이다. 이 연구에서 전달함수를 이용한 동특성분석은 상용 전산프로그램 STAR⁽¹²⁾를 이용하여 수행하였다.

3.2 동특성 분석

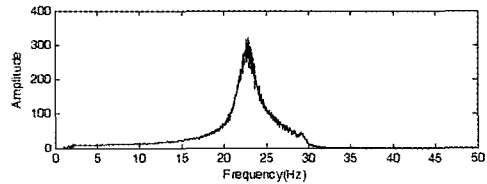
그림 10은 상부에 전선이 연결된 기본모델을 대상으로 동특성분석시험을 실시하여 얻어진 부상 상단 응답의 시간이력함수와 진동수함수의 형상이다. 그림 10의 응답신호와 진동대 상단 즉, 부상 고정구 하단에서 측정한 신호로부터 계산한 전달함수는 그림 11에 보인 바와 같다.

그림 11에서 확인하는 바와 같이 측정한 신호의 진폭과 위상각은 신호처리 이전과 비교하여 신호처리 이후에도 큰 변화가 없다. 이 논문에 제시하지 않았으나 부싱의 중간 높이에서 측정한 신호의 전달함수 형상도 최상단 응답신호의 전달함수 형상과 동일하며, 단지 진폭의 크기만 차이가 있다. 이를 참조하면, 변압기 부싱의 동적 거동은 단일 모드에 의해 지배되는 것으로 판단할 수 있다.

그림 11의 전달함수를 식 (4)로 변환한 후 다항식회귀분석기법을 적용하여 계산된 고유진동수는 21.8Hz이고, 감쇠비는 3.3%이다. 따라서 국내에서 운용 중인 154kV 변압기 부싱의 고유진동수는 지진의 주진동수 범위(2~10Hz)를 벗어나고, 이 부싱의 감쇠비는 현행 설계기준에서 제시하고 있는 감쇠비의 범위(2~8%) 이내에 존재한다는 사실이 규

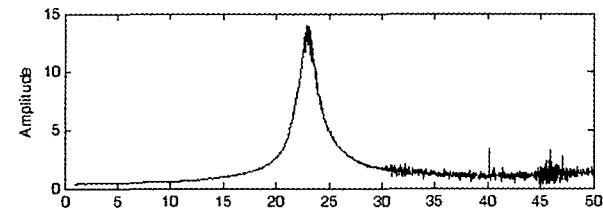


(a) 시간이력가속도

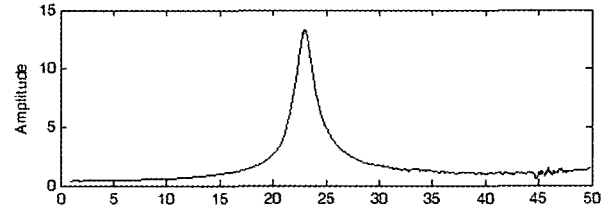


(b) 진동수함수

〈그림 10〉 정현소인파시험에서 측정한 기본모델(전선연결모델) 상단의 수평응답신호

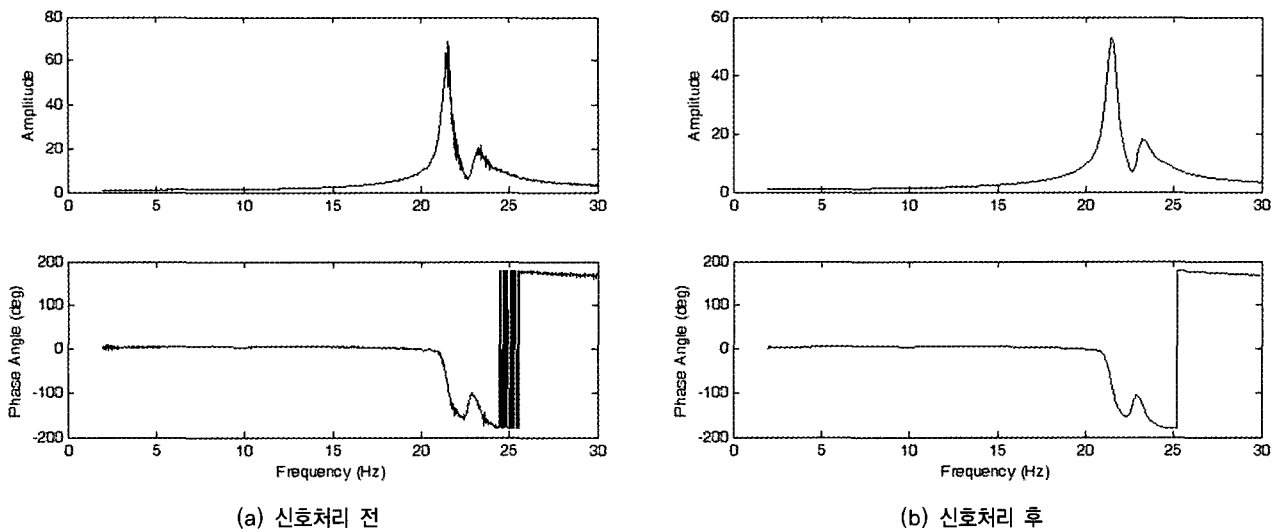


(a) 신호처리 전



(b) 신호처리 후

〈그림 11〉 정현파소인시험으로부터 얻어진 기본모델(전선연결모델) 상단 수평응답의 전달함수



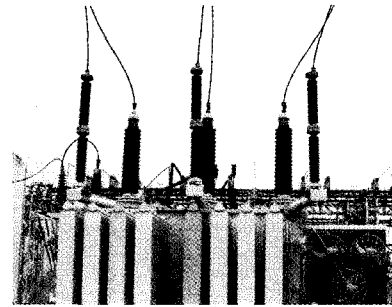
〈그림 12〉 정현파소인시험으로부터 얻어진 부싱 상단의 수평응답의 전달함수(전선 제거 모델)

명되었다.

상단에 연결되는 전선을 제거한 비교모델 부싱의 상단 응답의 전달함수는 그림 12에 보인 바와 같다. 이 비교모델의 전달함수로부터 계산된 기본고유진동수는 21.5Hz로서 전선이 부착된 상태와 비교하여 큰 차이가 없으나 감쇠비는 1.0%로 감소하고, 진동모드가 2개로 분리된다. 이로써 상부의 전선 연결 여부에 따라 부싱의 진동모드나 동특성이 달라질 수 있음을 알 수 있다.

그림 13은 실제 현장에 설치된 변압기 부싱의 상단에 전선이 연결된 모습이다. 시험 여건의 제약으로 인하여, 이 연구에서는 실제와 동일한 규격과 길이 및 연결방식을 대신하여 단지 현장과 동일한 규격의 전선으로 시험 대상 부싱의 상단과 진동대 밖의 고정구에 현수선 형태로 전선을 연결하였다. 그림에도 불구하고, 전선의 연결 전후에 부싱의 고유진동수 변화는 무시할 정도이므로 전선의 연결 방식이 부싱의 고유진동수에 미치는 영향은 작다고 판단된다.

한편, 현행 국내의 송변전설비 내진설계기준⁽⁵⁾에 제시되어 애자형기기에 적용하는 감쇠비는 단일 값이 아닌 값의 범위만이 규정되어 있으며, 그 최대값과 최소값의 차이가 크므로 설계자의 주관에 따라 서로 다른 감쇠비를 적용할 가능성이 있다. 그러므로 이 연구결과를 토대로 국내 154kV 변압기의 부싱에 대해서는 감쇠비를 3.0%로 제한할 필요가 있음을 확인하였다. 단, 이 연구는 국내의 애자형기기 중에서 설계수명 이상 사용된 구형 154kV 변압기 부싱만을 대상으로 하였으며, 전선의 연결조건 등의 구현이 제한적으로 향후에 설비의 용량과 종류별로 보다 다양한 동적시험을 실시하여 국내 송변전기기의 고유진동수와 감쇠비의 값을 정확하게 제시할 필요가 있다.

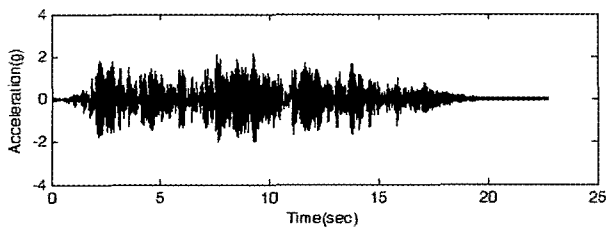


〈그림 13〉 현장에서 변압기 부싱 상단에 전선이 연결된 형태

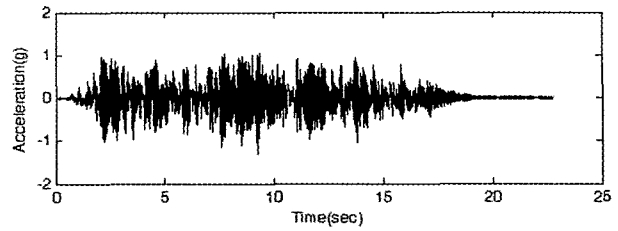
3.3 내진성능 및 파괴한도 분석

그림 14는 내진성능시험 중에서 대표적으로 0.53g 수준의 시험에서 측정한 부싱의 응답가속도의 시간이력 형상이다. 그림 14에서 부싱 상단의 최대 응답의 크기는 약 2.1g이고, 중단의 최대 응답은 약 1.3g 정도이다. 이로써 부싱의 동적 증폭비는 부싱의 상단과 중단에서 각각 4.0과 2.45 정도임을 알 수 있다.

그림 15는 내진성능시험에서 측정한 진동대운동과 부싱 응답의 최대가속도 관계를 보인 것이다. 그림에서 부싱 상단과 중단의 응답 특성은 약간 다르다. 즉, 0.53g 이하의 지진운동에서 부싱 상단의 응답가속도와 입력운동가속도의 관계는 선형적이고, 그 이후에는 비선형관계를 보인다. 반면에 부싱 중단의 응답은 1.0g의 입력운동 수준까지 그 관계가 선형적이다. 이 시험에서 부싱 상단의 응답은 애자가 아닌 부싱 머리에서 측정한 것이고, 중단의 응답은 애자의 표면에서 측정한 것이다. 따라서 부싱 상단의 거동은 부싱 머리에 연결되어 부싱 속으로 인입된 철심의 거동이 지배하여 중단의 응답과 다르게 나타난 것으로 판단된다.

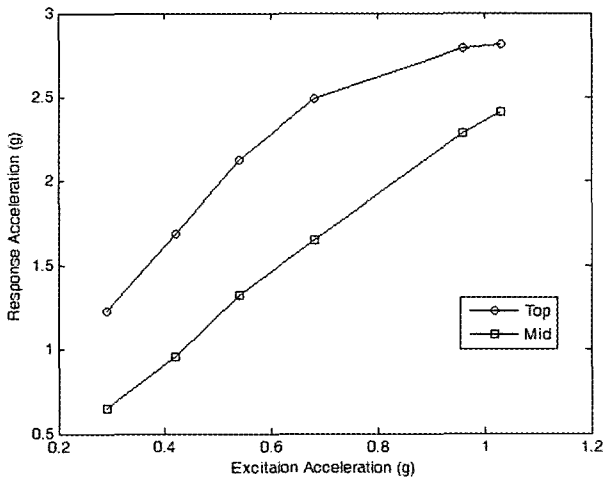


(a) 상단 응답 가속도



(b) 중단 응답 가속도

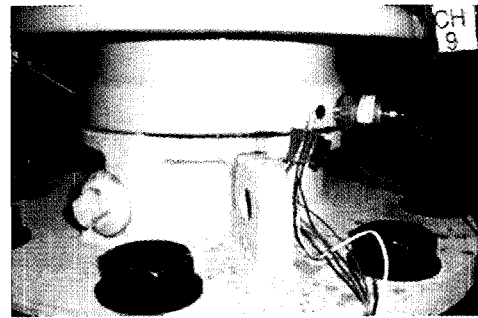
〈그림 14〉 0.53g 내진성능시험에서 계측한 부싱의 응답가속도 시간이력



〈그림 15〉 인공지진의 진동수준별 부싱 응답가속도의 변화

한편 진동대운동의 최대가속도가 0.53g 수준의 내진성능 시험에서 부싱 하단에 채결된 연결 볼트의 풀림이 발생하였다. 이 사실은 송변전설비의 내진성능을 보장하기 위하여 송변전설비의 유지 관리자는 정기적으로 볼트의 조임 상태를 점검할 필요가 있음을 시사한다. 그리고 부싱은 인공지진의 최대가속도가 0.53g 수준인 내진성능시험에서도 특별한 손상 없이 정상 거동하였다. 이 수준은 154kV 변압기(내진 II등급)가 지진구역 I에서 가장 약한 토사지반(S_E) 상에 건설된 것으로 가정하였을 때, 변압기의 상단에서 요구되는 붕괴방지수준 설계지진의 최대가속도($A=0.22$)에 변압기의 동적 증폭비인 1.7을 적용하여 계산된 설계가속도수준인 0.374g보다 높은 수준이다. 따라서 시험된 154kV 변압기 부싱은 국내의 설계기준이 요구하는 내진성능을 충분히 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

부싱의 파괴모드를 분석하기 위한 파괴한도시험에서는 부싱의 고유진동수와 일치하는 진동수를 갖는 지속시간 30초의 연속공진정현파를 입력운동으로 하여 그 진폭을 증가시켜 가면서 가진하였다. 이 시험에서 진동대에서 계측한 입력운동의 최대진폭이 0.85g의 수준으로 증가되었을 때, 부싱 하단의 개스킷이 파손되어 내부의 절연유가 누출되었다. 그림 16은 0.85g 파괴한도시험 직후에 부싱 하단에서



〈그림 16〉 파괴한도시험 과정에서 발생한 부싱의 개스킷 연결부 기름 누출

기름이 누출되고 있는 광경이다. 미국에서 실시한 유사 시험⁽⁸⁾에서도 변압기 부싱은 강한 진동 하에서 연결부의 개스킷이 손상되어 기름 누출이 발생하는 것으로 보고되었다. 부싱은 내부의 절연유가 유실되면, 절연 기능을 상실하므로 이 상태는 부싱의 기능적 파손을 의미한다. 이것으로 국내 변압기 부싱의 지진에 의한 파괴형태도 부싱과 변압기 본체의 연결부에 설치된 개스킷의 파손인 것으로 판명되었다.

4. 결론

이 연구에서는 국내의 전형적인 154kV 변압기의 주부품인 애자형 부싱을 대상으로 진동시험을 수행하고 부싱의 동특성과 내진성능을 분석하였다. 이 연구는 국내의 전력설비를 대상으로 수행한 최초의 동특성분석시험과 내진성능시험이라는 점에서 큰 의미가 있다. 시험결과를 분석함으로써 도출된 이 연구의 결론 및 제안사항은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 국내에서 운용 중인 전형적인 154kV 변압기 부싱의 동특성 분석결과, 이 부싱은 지진의 주진동수 구간을 벗어난 20Hz 이상의 고유진동수를 가지며, 감쇠비는 3.3%로 분석되었다. 그러므로 국내 154kV 변압기 부싱에 대해서는 국내의 설계기준에서 명시하고 있는 2~8%를 대신하여 4% 미만의 단일 감쇠비를 적용할 필요가 있다.

- (2) 국내 154kV 변압기 부상은 변압기 본체와 지반의 증폭비를 고려하더라도 국내 설계기준에서 요구하는 붕괴방지수준에 해당하는 내진성능을 충분히 발휘할 수 있다.
- (3) 국내 154kV 변압기 부상의 1차 파괴모드는 부상의 하단 개스킷 파손에 의한 절연유 유출과 기능상실이다. 그러나 1차 파괴모드 이전에서 부상의 연결 볼트는 풀림이 발생할 수 있으므로 정기적으로 볼트의 조임 상태를 점검할 필요가 있다.
- (4) 변압기 부상은 상부에 연결되는 전선 등의 영향으로 인하여 동특성이 달라질 수 있으므로 전력설비의 진동시험모델은 현장의 설치상태와 유사한 상태를 구현하여 제작할 필요가 있다.
- (5) 이 연구는 국내의 애자형기기 중에서 설계수명 동안 사용된 구형 154kV 변압기 부상만을 대상으로 하였다. 따라서 향후에 설비의 용량과 종류별로 다양한 시험을 실시하여 국내 송변전설비에 대한 동특성과 내진성능을 체계적으로 정리할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 인천대학교 공모 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자 일행은 학교의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 전력연구원, “내진설계기준 설정에 따른 송변전설비의 안전도 평가”, 최종보고서, 산업자원부, 2004.
2. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, IEEE Std 693-1997, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1997.
3. 日本電氣協會, 變電所等における 電氣設備の耐震設計指針, JEAG 5003, 1999.
4. 전력연구원, “송·변전설비 내진설계기준 설정 연구”, Technical Report, 01 전력연-단601, 한국전력공사 전력연구원, 2001.
5. 전력연구원, 송변전설비 내진설계 실무지침서(안), 한국전력공사 전력연구원, 2003.
6. Gilani, A. S., Chavez, J. W., Fenves, G. L. and Whittaker, A. S., “Seismic Evaluation of 196kV Porcelain Transformer Bushings,” *PEER-1998/02*, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, 1999.
7. Kiureghian, A. D., Sackman, J. L. and Hong, K. J., “Interaction in Interconnected Electrical Substation Equipment Subjected to Earthquake Ground Motions,” *PEER-1999/01*, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, 1999.
8. Gilani, A. S., Whittaker, A. S., Fenves, G. L. and Fujisaki E., “Seismic Evaluation of 550kV Porcelain Transformer Bushings,” *PEER-1999/05*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1999.
9. 한국전기연구소, 전기재료편람, 제3장 절연재료, 데이컴인터내셔널, 1990.
10. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Random Data - Analysis and Measurement Procedures, 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
11. Littl, J. N. and Shure, L., *Signal Processing Toolbox User's Guide for Use with MATLAB*, The Math Works, Inc., 1993.
12. The STAR System™, *User Manual*, Spectral Dynamics, Inc., 1996.