

변압기의 내진성능 향상을 위한 마찰진자 면진장치의 시험 연구

Experimental Study of Friction Pendulum System to Improve the Seismic Capacity of Transformer

장정범¹⁾ · 김정기²⁾ · 황경민³⁾ · 함경원³⁾ · 박진완⁴⁾ · 이찬욱⁵⁾

Jang, Jung-Bum · Kim, Jeong-Ki · Hwang, Kyeong-Min · Ham, Kyung-Won · Park, Jin-Wan · Lee, Chan-Wook

국문 요약 >> 본 연구에서는 전력설비 중 그 중요도가 가장 큰 변압기를 대상으로, 지진 발생 시 변압기의 파손을 방지하기 위하여 마찰진자 면진장치를 개발하고, 진동대시험을 통하여 그에 대한 내진성능을 입증하였다. 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치에 대해 압축재하시험 및 마찰시험을 수행한 결과, 변압기의 면진장치로서 적용 가능한 것으로 나타났으며, 특히 변압기 축소모형을 대상으로 진동시험대에 의한 내진성능시험을 수행한 결과, 기존의 일반 고정기초형식보다 변압기 기초부의 최대 응답가속도는 약 30%, 부상 상단의 최대 응답가속도는 약 59% 감소하였다. 또한, 마찰진자 면진장치 설치 후, 변압기의 고유진동수가 약 82% 감소하며 장주기로 이동함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 변압기에 마찰진자 면진장치를 적용하는 경우, 지진으로 인한 변압기의 파손을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 변압기, 내진성능, 마찰진자 면진장치, 진동대시험

ABSTRACT >> Friction pendulum system is developed to prevent the damage of transformer, which is the most important among the electric power facilities, due to the earthquake and its seismic capacity is verified through the shaking table test. The applicability of friction pendulum system is confirmed as test results of compressive capacity test and friction test. Especially, as a result of shaking table test with a large scale transformer model, friction pendulum system gives to the reduction of maximum response acceleration by 30% at anchorage of transformer and 59% at the top of porcelain bushing comparing with the existing anchorage type. In addition to the reduction of maximum response acceleration, natural frequency of transformer is shifted to long period due to the friction pendulum system. In case that friction pendulum system is applied to the transformer, the damage of transformer can be prevented effectively under the earthquake.

Key words Transformer, Seismic Capacity, Friction Pendulum System, Shaking Table Test

1. 서론

최근에 발생한 대규모의 지진은 주요 도시에 전력을 공급하는 많은 전력설비에 큰 피해를 일으켜왔다. 이러한 지진의 사례로 1994년 미국의 노스리지 지진, 1995년 일본의 고베 지진, 1999년 터키의 이즈미 지진과 대만의 치치 지진을 들 수 있다. 이러한 지진으로 인하여 직접적인 전력설비의

피해액은 각각의 지진에 대하여 수 억 달러에 이르는 것으로 보고되고 있다.^(1,2) 그 외에도 지진 발생 후 전력 공급 중단은 지진 피해지역의 비상조치와 기능복구에 큰 지장이 되고 있다. 따라서, 이들 전력설비들을 지진으로부터 보호하기 위한 방안을 수립하는 것이 점차적으로 중요하게 되었다. 실제로 이들 전력설비의 대부분은 초기 설계단계에서 낮은 수준의 지진에 대하여 내진설계를 하거나, 이를 설계에 반영치 않았기 때문에 지진에 대하여 매우 약한 내진성능을 보유하고 있는 것이 사실이다. 특히 변압기는 주요 전력설비를 대표하고 있고, 변압기의 기능 상실은 전체 전력 공급 기능에 큰 지장을 초래할 수 있다. 예컨대, 1994년 노스리지 지진과 1995년 고베 지진 발생 직후, 많은 변압기가 심각한 피해를 입었고, 변압기 상부에 설치된 부싱의 파괴로 인하여 전력 공급 기능이 중단된 바 있다.^(3,4) 그림 1은 이즈미

¹⁾ 정회원·한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 공학박사

(대표저자: jbjang@kepri.re.kr)

²⁾ 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

³⁾ 한국전력공사 전력연구원 선임보안연구원

⁴⁾ (주)브이테크 팀장

⁵⁾ (주)비엔티엔지니어링 부회장

본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

지진으로 인한 변압기의 피해사례를 보여주고 있다.

지진 발생 중 변압기의 주요 파손모드는 변압기 본체를 고정하는 정착장치의 파손, 누유, 그리고 락킹과 틸팅을 일으킬 수 있는 기초파손이 있다. 또한, 정착되지 않은 변압기는 때때로 대규모 지진 중 변압기에 전도가 발생하기도 한다. 반면에, 변압기의 과도한 정착장치는 높은 충격하중에 의해 변압기 내부 부품에 심각한 피해를 일으키기도 한다.

이외에도, 변압기에서 자주 발생하는 피해의 또 다른 유형은 변압기 상부에 설치된 부싱의 파손이다. 부싱의 파손은 변압기와 부싱 연결부에서의 누유 또는 부싱 몸체의 파손을 포함한다. 부싱은 취성재료이고 에너지 흡수능력이 거의 없기 때문에 부싱에서의 파손은 응력집중, 부싱 몸체의 들림, 개스킷의 미끄러짐에 의해 부싱 설치 끝단에서 발생한다.⁽¹⁾

따라서, 본 연구에서는 전력설비 중 그 중요도가 크고 전력공급 기능에 가장 큰 영향을 미치는 변압기를 대상으로, 지진 발생 시 변압기의 피해를 방지하기 위한 면진장치를 개발하고, 그 면진장치에 대한 성능시험과 변압기 축소모형에 의한 진동대시험을 통하여 개발된 면진장치의 내진성능을 평가하고 그 적용성을 입증하였다. 그 결과, 변압기에 적용한 면진장치를 적용하는 경우 효과적인 지진력 저감이 가

능하며, 이로 인해 지진 발생 시 변압기의 피해를 방지함으로써 안정적인 전력공급이 가능한 것으로 나타났다.

2. 면진장치

면진장치는 최근 10년간 구조물의 내진성능 향상을 위한 보강방안의 하나로써 널리 인기를 얻어왔다. 특히, 일본에서 1995년 고베 지진 이후 1,000여개 이상의 건물에 면진장치를 적용하였거나, 적용 중에 있다.

면진장치는 크게 2가지 형태로 구분되는데, 고무의 전단 강성과 감쇠를 이용한 탄성받침 계열과 PTFE (Poly-Tetra-Fluor-Ethylene)와 스테인레스판 간의 마찰감쇠를 이용하고 별도의 복원장치를 갖는 미끄럼받침 계열로 구분된다.⁽⁵⁾

표 1은 현재 상용화되어 적용되고 있는 주요 면진장치의 형상 및 특성을 나타내고 있다.

전력설비에 대한 면진장치는 처음으로 1988년 뉴질랜드에서 고전압 콘텐서 시스템에 적용되었다. 이 당시 적용한 면진장치는 강철 댐퍼를 지닌 저감쇠 납면진장치로 베어링은 400mm×400mm의 평면크기와 254mm의 높이로 제작되었다. 베어링의 하중 지지능력은 49kN이며, 이 면진장치는 고전압 콘텐서 시스템의 유효주기를 0.2초에서 1.8초로 증가시켰다.⁽⁶⁾ 또한, MCEER이 변압기를 대상으로 두가지 형태의 면진장치, 즉 고무받침과 미끄럼받침이 조합된 면진장치와 고감쇠 고무받침 계열의 면진장치를 개발하고 진동대시험을 통하여 변압기의 내진성능 향상 방안으로서 면진장치의 타당성을 입증하였다.⁽¹⁾ 이외에도 변압기의 내진성능 보강을 위한 많은 연구가 수행되었거나 진행되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

변압기를 위한 면진장치 개발 시 다음의 두가지 사항이 고려되어야 한다. 첫째, 변압기의 전체 중량이 건물에 비하여 가볍기 때문에, 그것이 변압기의 고유주기를 장주기로 변경시키기 어렵다는 점과 둘째, 면진장치는 지진 시 큰 변위의 발생없이 변압기와 부싱의 응답가속도를 저감시켜야



〈그림 1〉 변압기의 지진피해 사례

〈표 1〉 면진장치의 형상 및 특성

구분	에너지소산	복원	장단점
마찰진자 	마찰	진자에 의한 중력	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미끄럼받침 계열 ○ 간단한 구조 ○ 구조물의 무게와 무관
납-고무 베어링 	납의 소성	고무의 탄성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 탄성받침 계열 ○ 복잡한 구조 ○ 구조물 무게와 유관

한다는 것이다. 그것은 면진장치로 인하여 변압기에 발생한 큰 변위는 케이블로 연결된 인접 설비와의 상호 간섭을 고려하면 바람직하지 않기 때문이다.

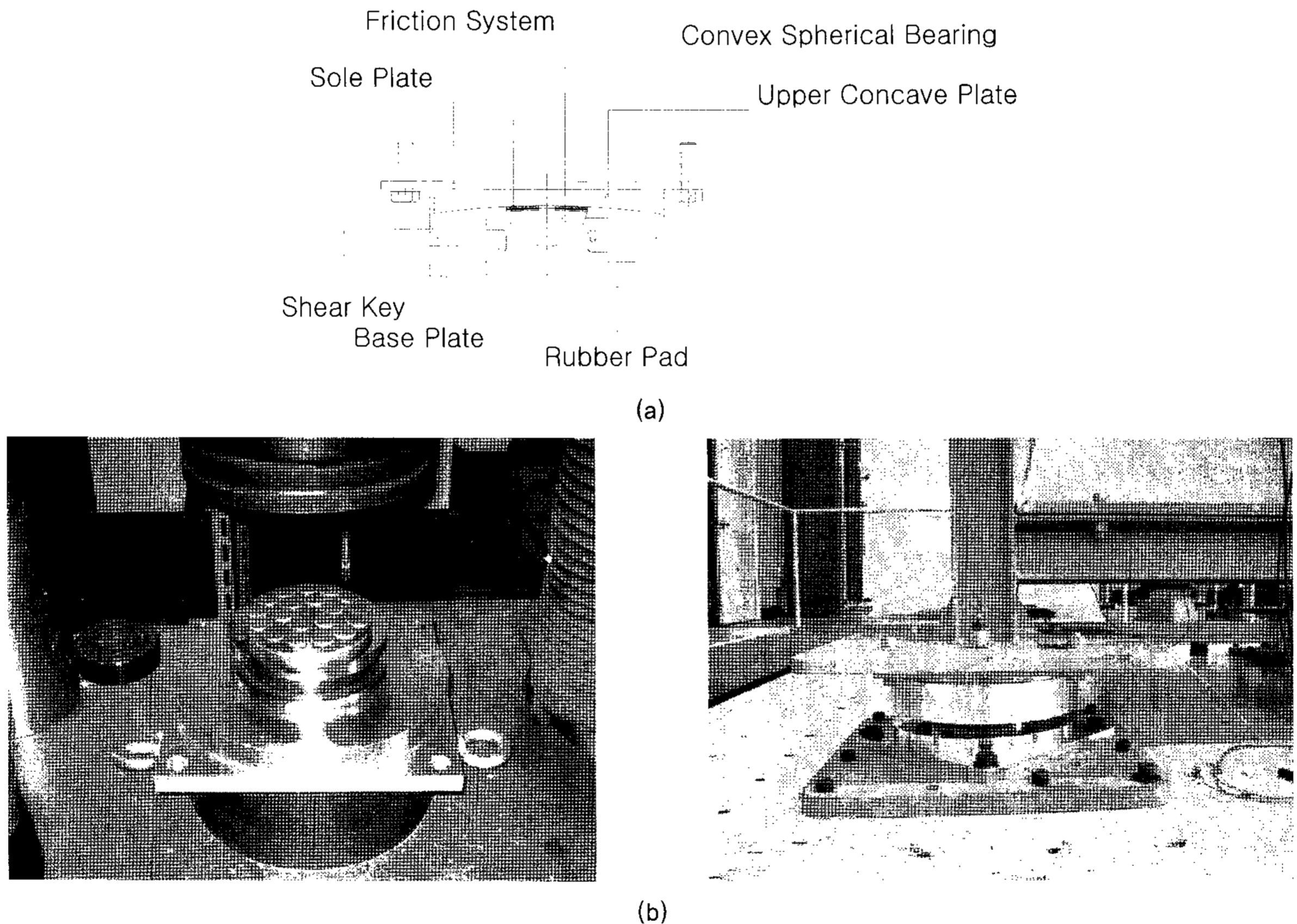
변압기와 같은 경량 구조체의 경우, 베어링에 작용하는 작은 축하중으로 인하여 좌굴(Buckling), 파단(Breaking), 크리프 안전성(Creeping safety) 요건을 만족하는 고무받침의 면진장치를 설계한다는 것은 매우 어렵다. 따라서, 그러한 대처 방안의 하나로 미끄럼받침 계열의 면진장치가 선호되고 있다.

상기와 같은 이유로 본 연구에서는 변압기의 내진성능 향상을 위하여 그림 2와 같은 마찰진자 면진장치를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치의 특성을 살펴보면, 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 Convex spherical bearing은 회전 및 고른 지압을 유도하며, Upper concave plate는 Convex spherical bearing과 함께 면진장치의 주기를 결정하고, Shear key와 Uplift restrainer는 들림에 의한 전도방지 기능을 갖추고 있다. 또한 Friction system은 다면에 의

한 고른 지압 및 마찰을, Rubber pad는 Shear key와 Uplift restrainer의 충돌에 의한 완충효과를 유도하도록 설계하였다. 본 면진장치는 전력설비인 변압기를 그 대상으로 하고 있기 때문에 마찰진자 면진장치 1개가 245kN의 상재하중을 지지할 수 있도록 설계하였으며, 본체는 SM490 구조용강으로 Friction system은 Filled PTFE 재질을 사용하였다. 또한 마찰진자 면진장치는 복원주기를 2초로 하여 곡률반경을 1,000mm로 설계, 제작하였으며, 이 경우 마찰진자 면진장치의 유효주기는 1.091초이다.

3. 성능시험

본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치는 AASHTO Guide⁽¹⁰⁾에 준하는 성능시험과 변압기의 축소모형을 대상으로 진동대시험을 수행하여 그 내진성능을 평가하였으며, 시험항목은 표 2와 같다.



〈그림 2〉 마찰진자 면진장치

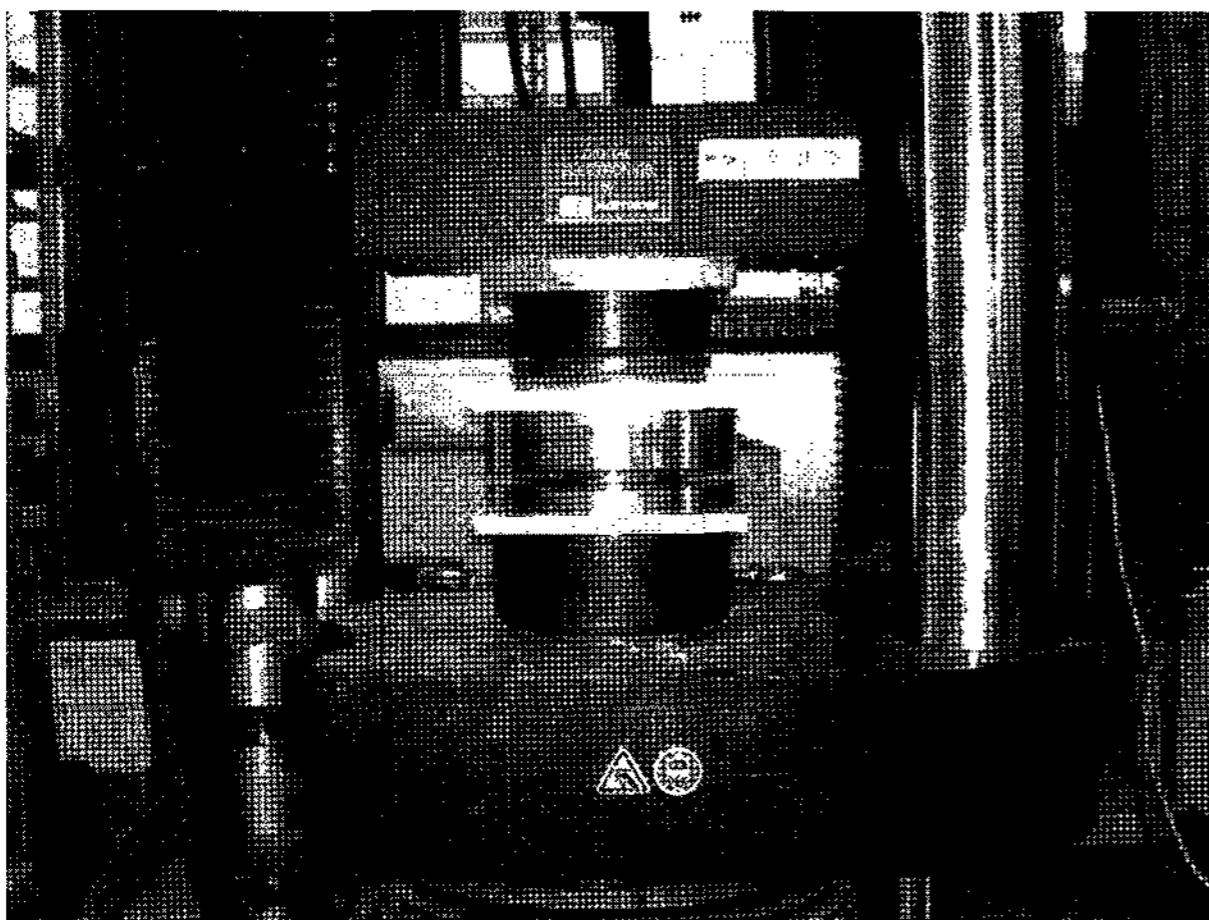
〈표 2〉 마찰진자 면진장치의 내진성능 시험항목

구분	시험 종류	시험방법	평가항목
1	압축재하시험	설계수직하중의 1.0배, 1.5배에 해당하는 하중으로 3분 유지	육안조사에 의한 이상유무 및 처짐 평가
2	마찰시험	수직하중 하에서 정속시험에 따른 마찰력 측정	마찰계수 평가
3	내진성능시험	변압기 축소모형을 대상으로 진동대시험	마찰진자 면진장치의 지진력 저감효과 평가

3.1 압축재하시험

상시 수직하중으로 인하여 압축을 받는 마찰진자 면진장치에서 크리이프와 영구변형 등의 발생여부를 판단하기 위하여 압축재하시험을 수행하였다. 이때, 압축하중으로는 설계 수직하중의 1.0배와 1.5배를 재하하여 3분간 유지하였다. 본 시험대상인 마찰진자 면진장치의 설계 수직하중은 245kN 이고, 그림 3은 압축재하시험을 보여주고 있다.

그림 4의 시험결과에서 알 수 있는 것처럼, 설계 수직하중의 1.0배에 대한 압축재하시험의 경우, 초기 처짐이 발생하였으나, 설계 수직하중의 1.5배에 대한 압축재하시험에서



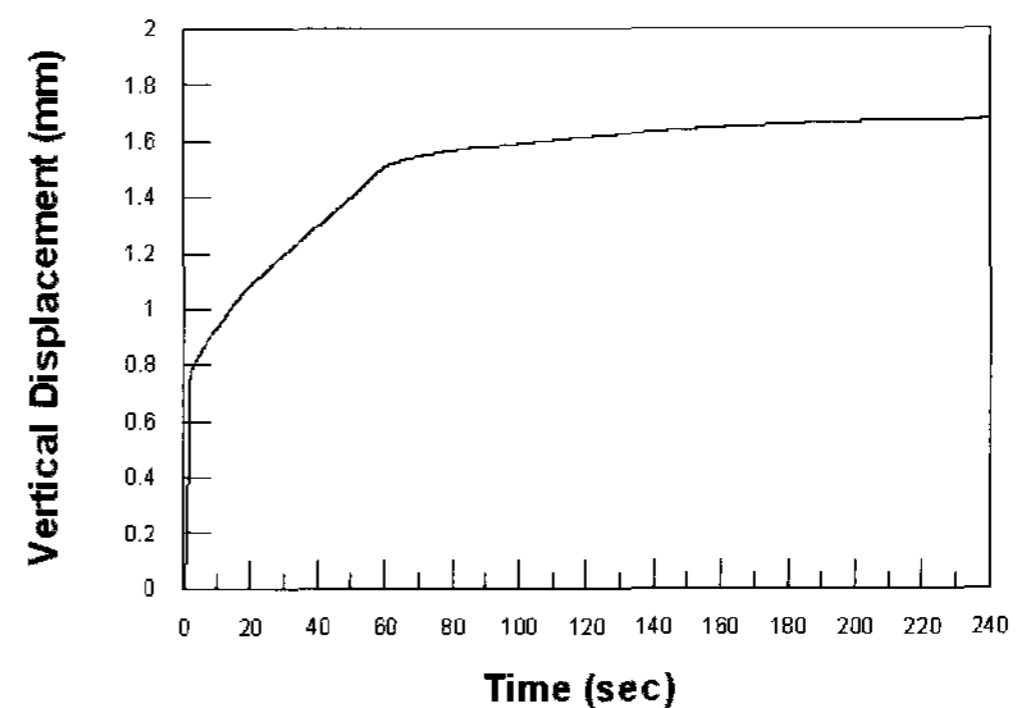
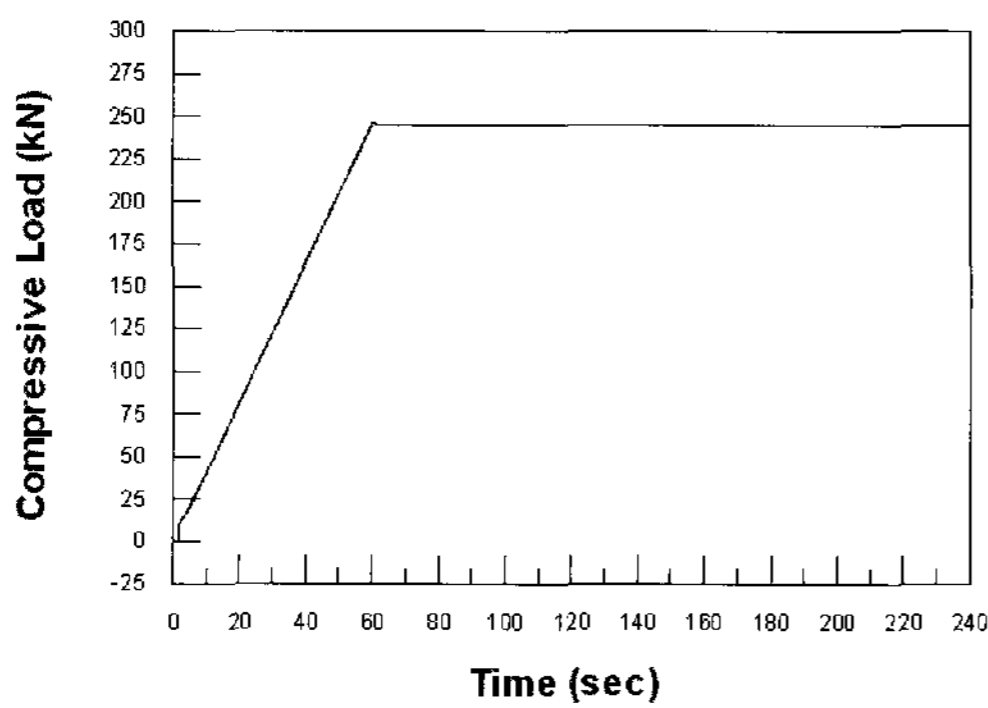
〈그림 3〉 마찰진자 면진장치의 압축재하시험

는 1.0배 시험 시 사용하였던 동일한 면진장치에서 수행함에 따라 초기 처짐은 발생하지 않았다. 설계 수직하중의 1.0배에 대한 압축재하시험 결과에서 초기 처짐을 고려하지 않으면 마찰진자 면진장치는 두 시험에서 각각 0.90mm와 1.32mm에서 변위가 수렴하는 것으로 나타났으며, 압축재하시험 후 마찰재에서는 이상이 발생하지 않았다.

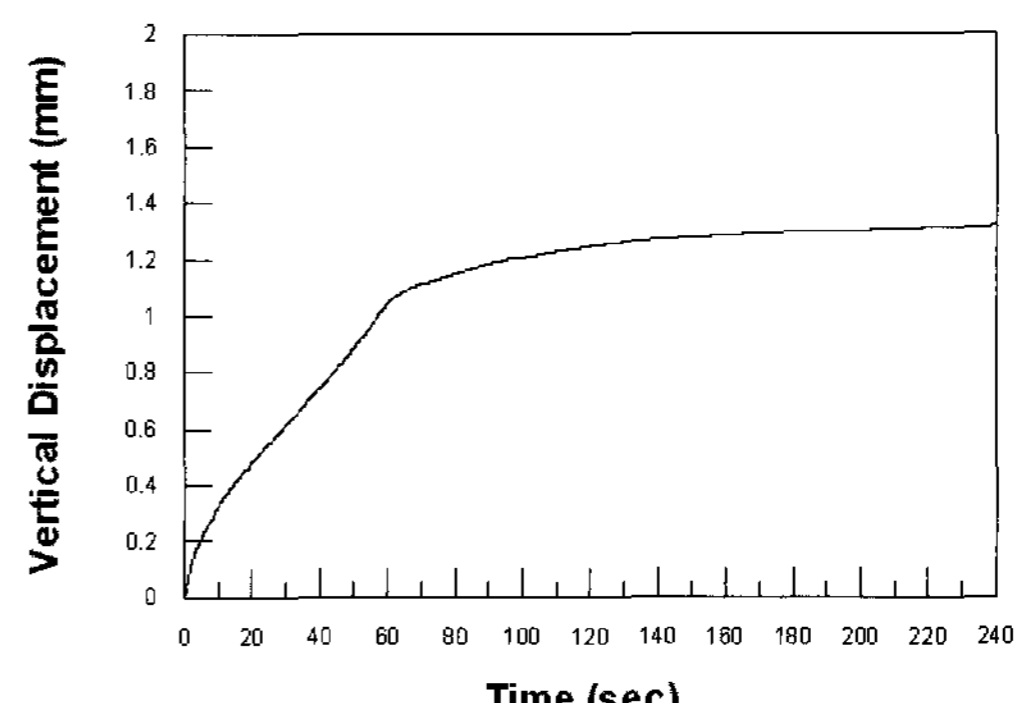
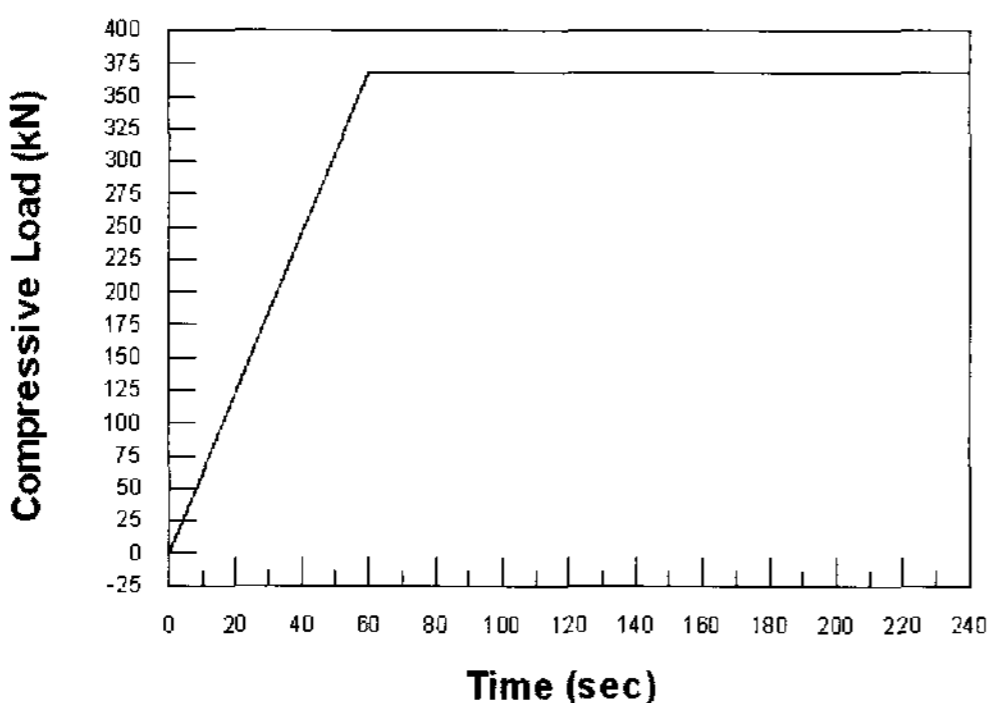
3.2 마찰시험

마찰진자 면진장치의 감쇠기능을 제공하는 마찰계수의 평가를 위하여, 수직하중 하에서 수평 정속시험을 속도별로 수행하고 마찰력을 측정하였다. 이 때, 수직하중으로는 마찰진자 면진장치의 설계 수직하중을 고려하였으며, 속도는 0.01mm/sec부터 마찰계수가 수렴하는 100mm/sec까지 고려하였다.

마찰시험결과는 그림 5 및 표 3과 같다. 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치의 마찰계수가 설계 시 고려한 마찰계수 6% 보다 크게 나타나고 있으나, 일반적인 PTFE와 스테인레스판 간의 마찰계수가 10~20%인 점⁽¹⁾, 면진대상 설비가 인접한 설비와 케이블로 연결된 변압기로서 지진 시 변위를 제한하여야 하는 점 그리고 상시 풍하중 등에 대한 저항을 고려할 때 약간 크게 나타나는 마찰계수는 적절한 것으로 판단된다.

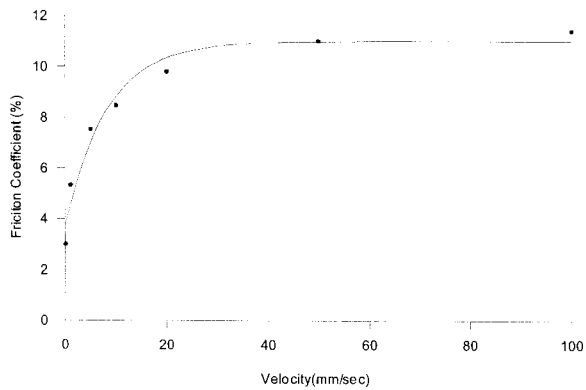


(a) 설계 수직하중의 1.0배



(b) 설계 수직하중의 1.5배

〈그림 4〉 마찰진자 면진장치의 압축재하시험 결과



〈그림 5〉 마찰진자 면진장치의 마찰시험결과

〈표 3〉 마찰진자 면진장치의 마찰특성

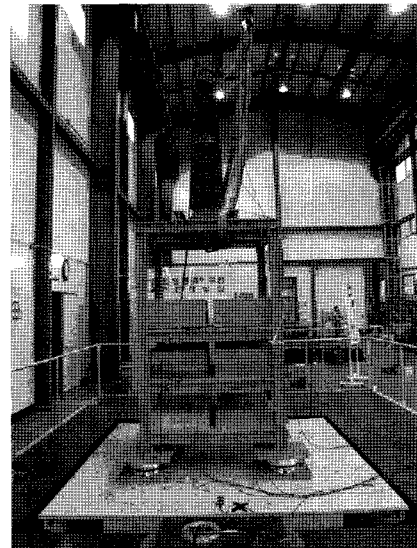
구분	크기
최대 마찰계수	11.00%
최소 마찰계수	3.78%

3.3 내진성능시험

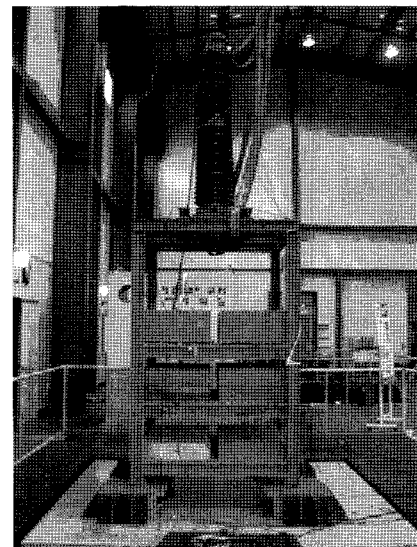
본 연구대상인 변압기는 크게 강재로 제작된 변압기 본체와 변압기 상부에 설치되고 애자로 제작되는 부싱으로 구분되며, 변압기 본체의 고유진동수는 13Hz 이상으로 나타나, 부싱은 4~8Hz의 범위의 고유진동수를 가지는 동특성을 지니고 있다.⁽²⁾ 따라서, 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치의 응답 가속도 저감효과를 분석하기 위하여 앞서 언급한 바와 같이 변압기의 동특성과 유사하도록 축소모형(1.35m×1.35m×2.0m, 98kN)을 설계하여 내진성능시험을 수행하였다. 변압기의 축소모형은 그림 6과 같은 기하학적 형상을 가지며, 실제 변압기의 본체와 부싱의 고유진동수를 고려하여 축소모형은 1 차 고유진동수가 8~10Hz에서 발생하도록 설계하였다. 또한 실제 변압기와 같이 축소모형 상부에 애자로 제작된 부싱을 설치하여, 진동대시험 시, 변압기 축소모형에 발생하는 가속도를 측정함으로써 면진장치로 인한 변압기의 응답 가속도 저감효과를 평가할 수 있도록 하였다.

마찰진자 면진장치의 응답 가속도 저감효과를 확인하기 위하여 그림 7과 같이 변압기 하부를 브라켓으로 고정된 일반 고정기초 형식과 마찰진자 면진장치가 설치된 경우를 고려하여, 동일한 지진 하에서 그 거동을 비교, 분석하였다.

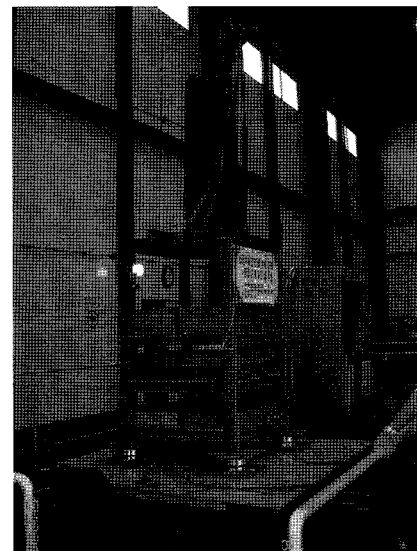
진동대 시험 전 변압기 축소모형에 대한 동특성을 분석하기 위하여 충격가진기를 이용한 모드해석을 실시하였다. 변압기 모드의 측정방법은 그림 8과 같으며, 시험방법은 센서가 위치한 부분을 충격가진기로 가진하고, 그에 따른 가진력과 진동응답을 계측하여 모든 계측점에서의 주파수 응답 함수 분석을 실시하여 고유 진동수와 모드형상을 추출하였



〈그림 6〉 변압기 축소모형



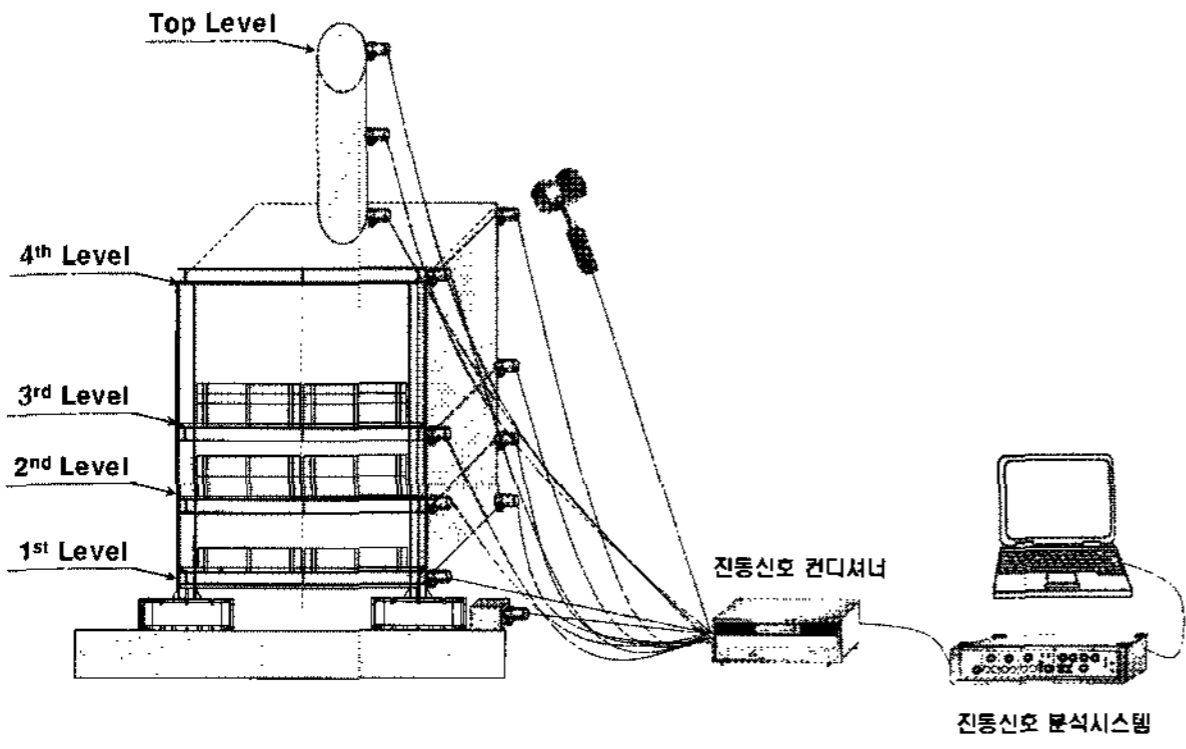
(a) 고정기초



(b) 마찰진자 면진장치

〈그림 7〉 마찰진자 면진장치의 내진성능시험

다. 주파수 응답함수 분석결과, 표 4와 같이 1 차 고유진동수는 8.8Hz에서 발생하는 것으로 나타나, 변압기 축소모형이 본 연구에서 의도한대로 실제 변압기의 동특성을 모사할 수 있도록 적절하게 설계된 것으로 나타났으며, 이 때 모드 형상은 그림 9와 같다.



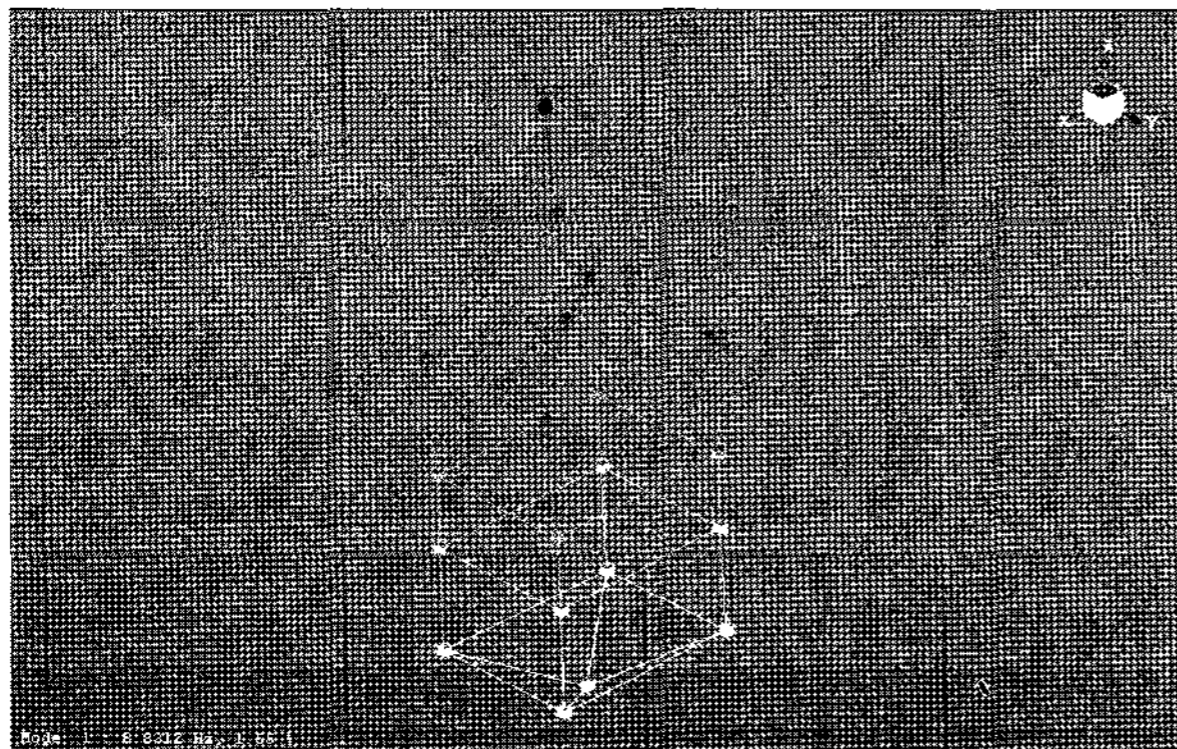
〈그림 8〉 모드 측정방법 및 흐름도

마찰진자 면진장치의 내진성능시험에 사용된 지진파는 그림 10과 같이 변압기 내진설계에 적용되는 송변전설비 표준설계 응답스펙트럼에 준하는 인공지진파를 사용하였다.⁽¹¹⁾ 시험결과, 그림 11, 12 및 13과 같이 변압기에 마찰진자 면진장치를 적용하는 경우가 기존의 일반 고정기초 형식보다 변압기 기초부에서 최대 응답가속도가 약 30% 감소하였으며, 부상 상단의 최대 응답가속도는 약 59%가 감소하였다. 표 5는 변압기 축소모형에서 계측된 위치 별 최대 응답가속도를 나타내고 있다.

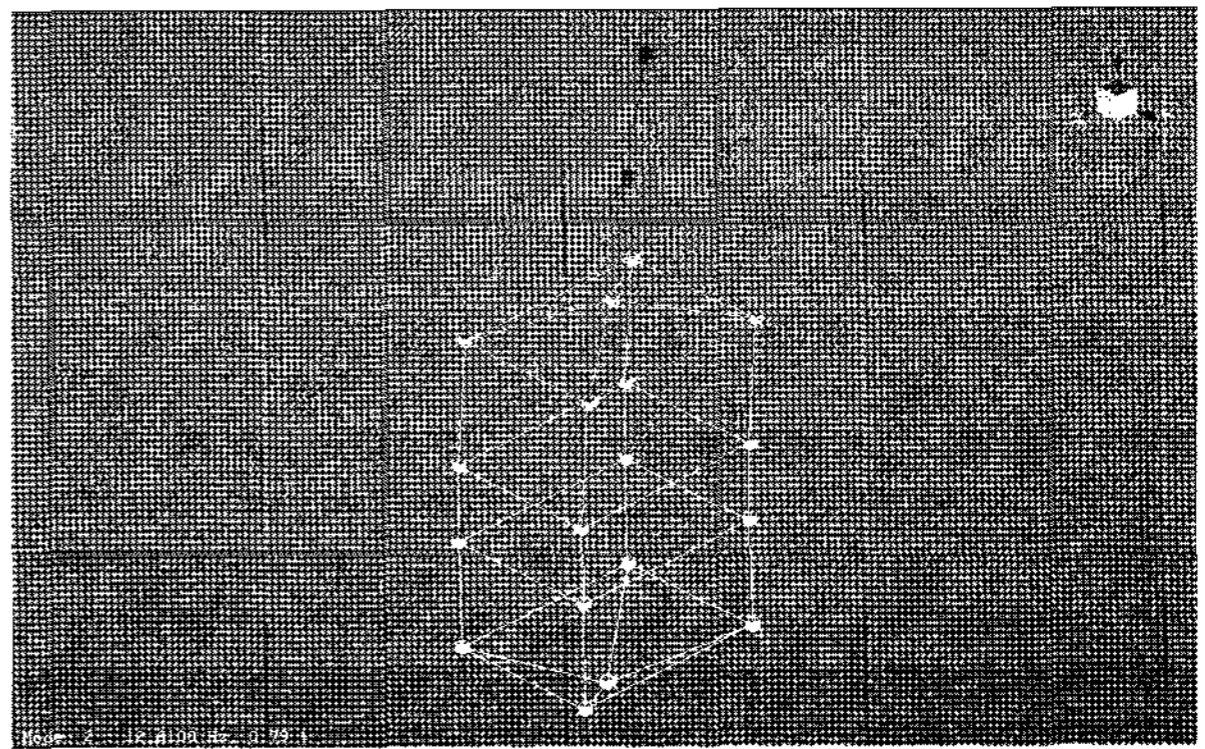
진동대시험 시 변압기 축소모형에 설치된 각 가속도계에서 계측된 가속도 응답을 분석한 결과, 일반 고정기초 형식의 경우, 충격가진기를 이용하여 구한 고유진동수 8.8Hz와 거의 일치하는 8.3Hz에서 1 차 최대 응답가속도를 보였으나, 마찰진자 면진장치가 설치된 경우에는 1.5Hz에서 1 차 최대 응답가속도가 발생하는 것으로 나타나, 마찰진자 면진장치 설치 후 변압기의 고유진동수는 약 82% 감소하며 장

〈표 4〉 모드분석결과

구분	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
고유 진동수(Hz)	8.8	12.6	16.5	22.2	32.9	40.3

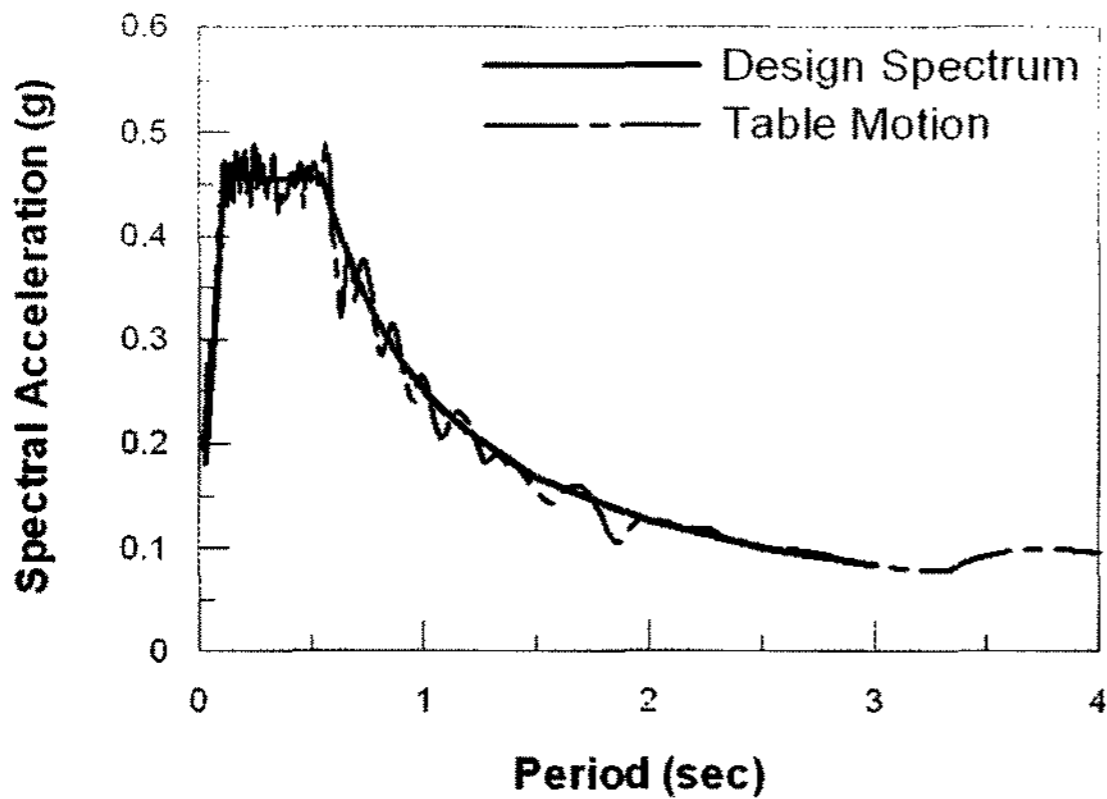


(a) 1 차 모드

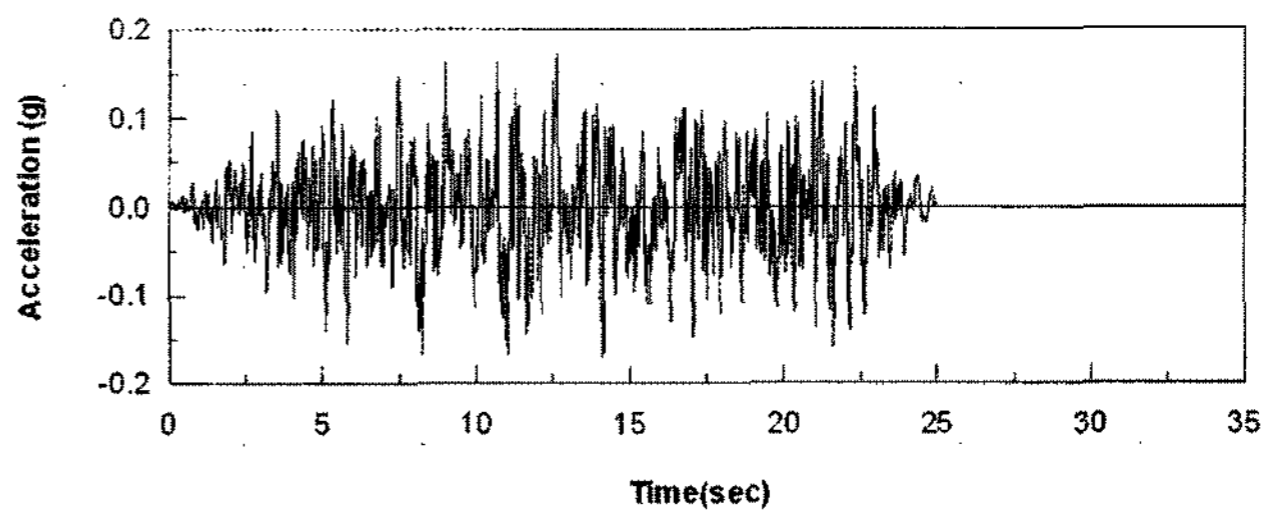


(b) 2 차 모드

〈그림 9〉 모드형상

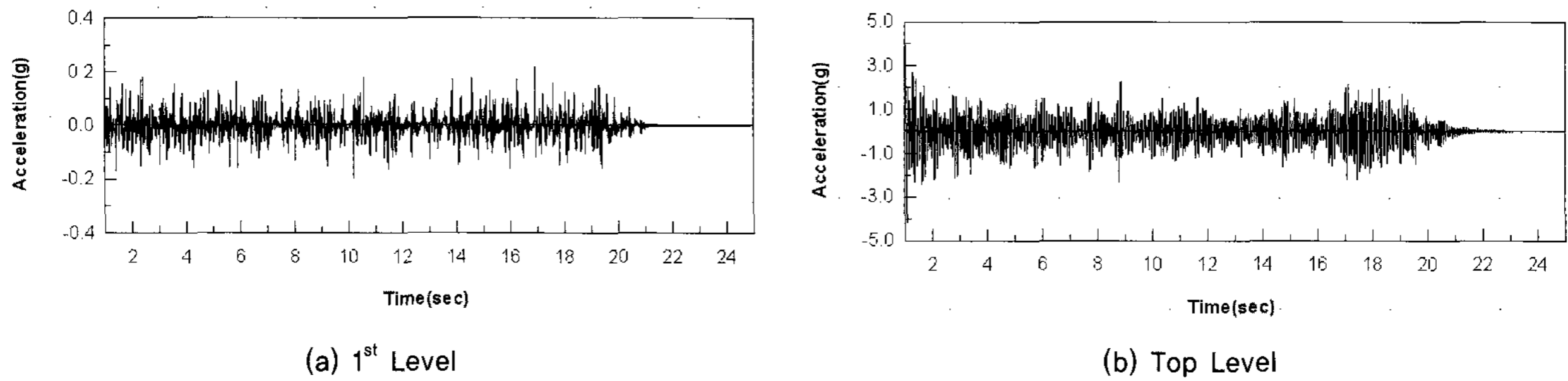


(a) 표준설계 응답스펙트럼

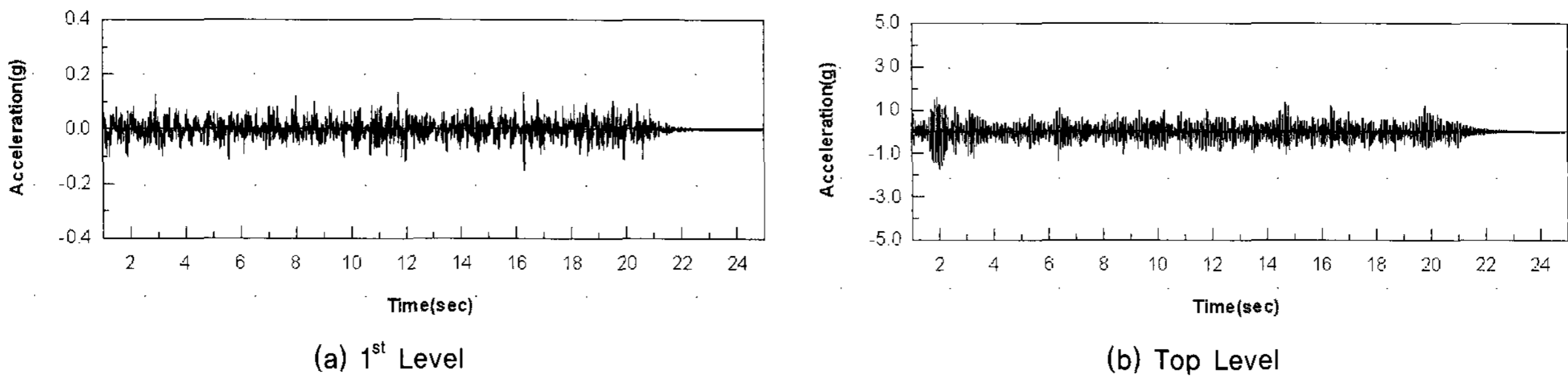


(b) 시간이력 인공지진파

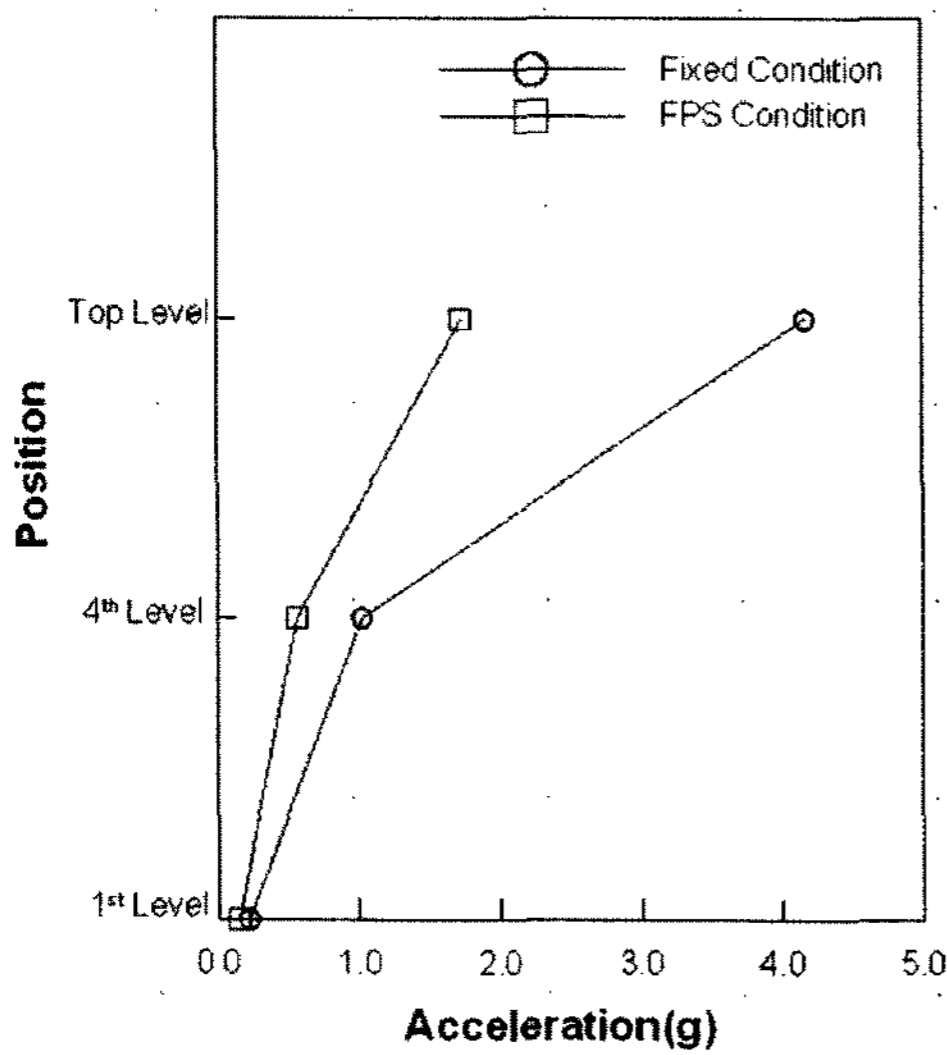
〈그림 10〉 마찰진자 면진장치의 내진성능시험용 지진파



〈그림 11〉 일반 고정기초 형식의 진동대시험 결과



〈그림 12〉 마찰진자 면진장치의 진동대시험 결과



〈그림 13〉 변압기 축소모형의 최대 응답가속도

〈표 5〉 변압기 축소모형의 최대 응답가속도

구분	일반 고정기초 형식 (g)	마찰진자 면진장치 (g)
1st Level	0.22	0.15
4th Level	1.02	0.57
Top Level	4.16	1.73

주기로 이동함을 확인할 수 있었다. 마찰진자 면진장치의 고유주기가 설계 시 유효주기 1.091초 보다 작게 나타나는 것은 제작된 Friction system의 마찰계수가 설계 시 보다 크게 나타났기 때문으로 판단된다.

또한, 마찰진자 면진장치를 적용한 경우에 대한 진동대시험 시, 그림 8의 1st Level에서 계측된 수평변위를 분석한

결과, 최대 5.9mm가 발생함에 따라 변압기와 인접 설비간의 케이블 여유 길이를 고려할 때, 이로 인한 변압기와 인접 설비 간의 상호 간섭은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치를 변압기에 적용하는 경우, 지진으로 인해 변압기에 발생하는 응답가속도가 크게 저감됨에 따라 변압기의 지진피해를 효과적으로 방지할 수 있으며, 이에 따라 안정적인 전력공급이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전력설비 중 그 중요도가 크고 전력공급 기능에 큰 영향을 미치는 변압기를 대상으로, 지진 시 변압기의 피해를 방지하기 위하여 미끄럼 받침계열의 마찰진자 면진장치를 개발하고, 진동시험대를 이용하여 변압기 축소모형에 대한 내진성능시험을 수행하였다.

마찰진자 면진장치에 대해 압축재하시험 및 마찰시험을 수행한 결과, 변압기의 면진장치로서 적용 가능한 것으로 나타났으며, 특히 진동시험대를 이용하여 변압기 축소모형에 대한 내진성능 시험결과 기존의 일반 고정기초 형식보다 변압기 기초부에서 최대 응답가속도가 약 30% 감소하였으며 부상 상단의 최대 응답가속도는 약 59%가 감소하였다. 또한, 마찰진자 면진장치 설치 후, 변압기의 고유진동수도 8.3Hz에서 1.5Hz로 약 82% 감소하며 장주기로 이동하였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 마찰진자 면진장치를 변압

기에 적용하는 경우, 지진으로 인해 변압기에 발생하는 지진력이 크게 저감됨에 따라 변압기의 지진피해를 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Murota, N., Feng, M. Q. and Liu, G. Y., "Experimental and Analytical Studies of Base Isolation Systems for Seismic Protection of Power Transformers", Technical Report MCEER-05-0008, MCEER, 2005. 9.
2. (사)일본전기협회, 변전소 등에 있어서 전기설비의 내진설계 지침, JEAG 5003, 1999.
3. Shinozuka, M., "The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17:1995 Performance of Lifelines", Technical Report NCEER-95-0015, Buffalo, N.Y.: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, 1995.
4. Pansini, J. A., *Electrical Transformers and Power Equipment*, Prentice Hall, 1988.
5. 이찬욱, 엄태건, 김왕춘, 장정범, 합성마찰진자 면진장치 개발, 한국전력공사, 2008. 1.
6. Skinner, I. R., Robinson, H. W., and McVerry, H. G., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
7. Wilcoski, J., "Demonstration of CERL Equipment Fragility and Protection Procedure by Fragility Testing of a Power Transformer Bushing", ATC-29-1, Seminar Technical Papers, 1997.
8. Villaverde, R. and Pardoen, G., "Ground Motion Amplification at Base of Bushings Mounted on Electric Substation Transformer", A Technical Report of Research Supported by PEER/PG&E Under Award No. PGE-09566, Department of Civil Engineering, University of California, Irvine, 1999.
9. Gilani, A. S., Chavez, J. W., Fenves, G. L. and Whittaker, A. S., *Seismic Evaluation of 550kV Porcelain Transformer Bushings*, PEER, 1999.
10. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, 1999.
11. 한국전력공사, 송·변전설비 내진설계기준 설정 연구, 2001. 11.
12. Iizuka, M., Takaoka, E., Takenaka, Y., and Yoshikawa, K., "Shaking Table Tests of Base Isolation Systems Consisting of Rubber Bearings and Sliding Bearings", *Proceedings of The 10th Earthquake Engineering Symposium*, Yokohama, Japan, 1998.