2003 추계학술발표회 논문집 한국원자력학회

소형기기 면진장치의 기계적 특성 분석

Mechanical Characteristics of Base Isolation Systems for Secondary Equipment

전영선, 김민규, 최인길 한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 소형기기의 면진에 사용할 수 있는 면진장치를 제작하여 그 특성시험 분석을 통 해서 실제의 적용가능성 여부를 알아보고자 하였다. 기기면진을 위한 면진장치로는 마찰진자형 베어링(Friction Pendulum System: FPS), 천연고무베어링(Natural Rubber Bearing: NRB) 그리고 고감 쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 사용하였다. 저중량 소형기기의 면진을 대 상으로 하였으므로 설계하중을 400kg으로 하여 면진장치를 설계하였으며, 수평 및 수직 각각 10ton 용량의 유압가력기를 설치하여 실험을 수행하였다. 실험결과 고무베어링의 경우는 면진장 치의 형상비와 감쇠특성이 그리고 FPS의 경우는 마찰면의 곡률반경이 기계적 특성을 결정짓는 중 요한 인자임을 알 수 있었다.

주요어 : 기기면진, 마찰진자형 베어링(FPS), 천연고무베어링(NRB), 고감쇠고무 베어링(HDRB)

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies of the mechanical characteristics of base isolation systems for secondary equipment. The Friction Pendulum System (FPS), natural rubber bearing (NRB) and high damping rubber bearing (HDRB) were selected for the isolation systems. 400kg design loads were selected and 10ton actuators are used in vertical and horizontal direction in this test. Finally, it is noted that the shape factor and damping characteristics of rubber bearing and length of curvature of the concave surface of FPS are the important factor of the isolation systems.

Key word : equipment isolation, Friction Pendulum System (FPS), Natural Rubber Bearing (NRB), High Damping Rubber Bearing (HDRB)

1. 서 론

외부로부터 가해지는 지진하중으로부터 구조물을 안전하게 유지시킬 목적으로 많은 종류의 면 진장치가 사용되고 있다. 이러한 면진장치들은 많은 경우 구조물과 기초사이에 설치가 됨으로 인 하여 기초로부터 전해지는 지진력을 구조물의 상부로 전달시키지 않도록 하는 역할을 하게된다. 면진장치의 기계적 특성평가에 관한 연구는 과거에 많이 수행되어 다양한 종류의 면진장치가 실 제 구조물에 설치된 사례가 많이 있다. 실험적 연구는 미국, 일본, 뉴질랜드 등 대규모 지진이 빈 번하게 발생하는 국가를 중심으로 많이 수행되어 왔으며, 국내의 경우 면진장치를 생산하는 기업 체 등에서 일부 수행한 결과들이 있다. 국내의 연구로는 김대곤 등^[1]의 연구에서는 온도에 따른 면진장치의 특성을 평가하였으며 유봉 등^[2]의 연구에서는 축소시험모델을 이용한 특성평가를 수행 하였다. 전영선 등^[3]은 실제 사용하는 LRB에 대하여 다양한 실험조건에서 실험을 수행하여 거동 특성 및 기계적 특성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 구조물에 적용하기 위한 면진장치가 아닌 저중량의 기기에 사용할 수 있는 소규모 면진장치에 대한 특성실험을 수행하였다. 저중량 기기에 적용하기 위해서는 면진장치의 전단강성이 작아져야 하므로 면진장치의 설계가 일반적이지 않을 수 있다. 또한 LRB와 같이 중간에 납이 삽입된 경우는 면진장치의 설계자체가 불가능하게 된다. 따라서 고무계 면진장치로 천연고무 베어링(Natural Rubber Bearing: NRB)를 선택하여 면진장치를 제작하였다. 그러나 NRB 의 경우는 감쇠특성의 거의 나타나지 않으므로 탄성거동을 하게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 고감쇠고무를 이용한 고감쇠고무 베어링(High Damping Rubber Bearing: HDRB)을 또한 제 작하여 실험을 수행하였다. 이러한 고무계 면진장치와 별도로 최근에 널리 사용되고 있는 FPS를 제작하여 최종적으로 3종의 면진장치를 이용한 실험을 수행하였다. 설계하중은 400kg으로 설정하여 실제로 구조물 내부의 기기면진을 위한 장치로 사용할 수 있는 크기가 되도록 하였다.

2. 특성시험대상 면진장치

2.1 NRB 와 HDRB

본 실험에서 사용한 고무베어링은 NRB와 HDRB로서 실제로 가장 널리 사용하는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 사용하지 않은 것은 기기면진의 경우 구조물의 면진과는 달리 상부하중이 상 대적으로 작으므로 인하여 LRB를 사용할 경우 면진효과를 발휘하기 어렵다는 판단에 기인한 것 이다. NRB는 면진장치로서 널리 사용되었으나 감쇠효과가 거의 없으므로 최근에는 별로 사용되지 않는 면진장치이며 HDRB는 감쇠특성이 뛰어난 고무를 이용하여 제작하여 LRB와 같은 감쇠특성을 얻고자 하는 면진장치로서 최근 들어 널리 사용하고 있는 면진장치이다. 고감쇠고무를 이용 한 면진장치에 대한 연구는 국내에서는 거의 수행된 바가 없으나 외국의 경우 이에 대한 실험적, 해석적 연구가 다양하게 수행되고 있는 실정이다. Hwang 과 Ku^[4] 는 HDRB의 해석적인 모형을 개발하여 실험결과와의 비교분석을 수행하였으며, Watanabe 등^[5]은 HDRB를 2층 구조물의 면진장 치로 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 또한 Abe 등^[6]은 NRB, LRN, HDRB를 모두 교량의 면진에 사용하여 그 결과를 비교한 바 있다.

본 실험에서는 NRB와 HDRB의 설계를 위하여 상부하중에 따른 목표공진주파수를 결정하였다. 전술한 바와 같이 본 연구는 소형 기기를 대상으로 하였으므로 상부의 중량이 400kg이다. 이와 같은 경우 고무베어링의 단면이 커지면 면진효과가 전혀 발생하지 않는 단점이 있다. 따라서 제 작가능한 고무베어링중에 가장 작은 단면을 선택하여 2.3Hz의 공진주파수를 가지도록 설계하였다. 또한 면진장치의 설계에 있어서 수평강성과 관련되는 단면을 감소시키기 위하여 중공형 단면을 사용하여 단면적을 최소화 할 수 있었다. 본 실험에 사용된 면진장치의 제원은 그림 1(a)에 제시 한 바와 같이 직경 50mm인 중공형 단면에 높이는 58mm로 설계하였다. 설계에 따라 제작된 면 진장치의 모형은 그림 1(b)에서 제시한 바와 같다. NRB와 HDRB는 고무만 다른 종류를 사용하 였으며 동일한 형상으로 제작하였다. 그립에서 보는 바와 같이 고무 한 층의 높이는 8mm이며 5 층의 고무가 사용되었으므로 전체 고무높이는 40mm이다. 이러한 형상은 일반적이지는 않으나 실험의 목적에 부합하도록 제작한 것이다. 따라서 이러한 비정상적인 형상계수로 인한 영향이 실 험결과에서 나타날 수 있음을 예상할 수 있다.



그림 1. 실험에 사용한 NRB와 HDRB

2.2 FPS

FPS는 고무계 베어링에 비하여 내구성이 우수하고 상부하중의 변화에 따라 고유진동수가 변하 지 않는다는 장점이 있으므로 1990년 이후 각광을 받고 있는 면진장치이다. 본 연구와 같이 상부 하중이 작은 기기를 대상으로 한 면진에는 적용이 용이한 것으로 판단이 된다. FPS에 대한 연구 는 1990년 Zayas 등^[7]에 의하여 시작되어 외국의 경우에는 구조물에 적용한 사례도 많이 보고되고 있다. 그러나 국내의 경우 구조물에 적용된 것은 없고 현재 발전시설이나 원전시설들에 대한 적 용성이 검토되고 있는 단계이다. 특성시험에 대한 연구로는 김영중 등^[8]과 이경진 등^[9]이 실험에 의하여 마찰진자형 베어링의 기계적 특성에 관한 연구를 수행하였고, 최근에는 김대곤 등^[10]이 FPS를 이용하여 원전 주제어실에 대한 면진에 관한 해석적인 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이 러한 연구들은 대형 구조물에 사용할 수 있는 FPS에 대한 연구들이며 본 연구에서 사용할 FPS는 전술한 고무계 베어링과 같이 작은 기기에 적용하기 위한 소형의 FPS이다

본 실험에 적합한 FPS의 고유주파수는 1Hz로 결정하였다. 이것은 고무계 베어링과 고유진동수 에서 너무 큰 차이가 발생하면 비교에 어려움이 있을 것으로 판단하여 결정한 것이다. 따라서 다

음 식 (1)과 식 (2)에 의하여 FPS 마찰면의 곡률반경은 24.8cm로, 수평강성은 4.02 kgf/cm²로 결정 하였다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \tag{1}$$

$$K = W/R \tag{2}$$

여기서, T는 FPS의 주기, R은 FPS의 곡률반경, g는 중력가속도, K는 FPS의 유효수평강성 그리고 W는 상부하중이다. 주목할 것은 제작된 FPS 마찰면의 곡률반경이 다른 연구에서 사용한 것에 비하여 상대적으로 작다는 것이다. FPS의 곡률반경이 작을 경우 마찰력에 의해서만 면진효과가 발휘되는 것이 아니고 곡면에 의한 수평분력이 크게 작용하므로 또 다른 결과를 유추할 수도 있 을 것으로 판단된다. 결정된 값으로 설계한 FPS의 제원과 제작된 형상은 그림 2와 같다.



(a) 제원

그림 2. 실험에 사용한 FPS

3. 특성시험 방법

3.1 시험개요

선정된 면진장치의 특성시험을 위하여 수평방향과 수직방향 모두 10ton 용량의 유압가력기 (actuator)를 설치하여 그림 3과 같은 성능시험장치를 제작하였다. 성능시험장치에 면진장치별로 각각 4개씩을 이용하여 하나의 시험체로 제작하여 실험을 수행하였다. 따라서 면진장치 하나를 이용해서 특성시험을 수행한 것에 비하여 실제의 거동을 유추할 수 있고 실제상황을 더 잘 반영 한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. Jig plate에 면진장치가 설치된 사진은 그림 4와 같다. 수직하 중과 수평하중은 가력기에 설치된 계측기를 이용하여 측정하였고, 수평변위와 수직변위는 각각 변 위계를 이용하여 계측하였다.



그림 3. 특성시험장치



그림 4. 특성시험장치에 설치된 고무베어링모양

3.2 NRB와 HDRB

3.2.1 수평방향 가진 시험

동일한 형상으로 제작된 NRB와 HDRB의 수평전단시험에 의한 기계적 특성평가를 수행하기 위 하여 전술한바와 같은 특성시험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 특성시험은 0.1Hz의 동일한 주파수를 가지는 정현파를 이용하였으며 최대변위를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 최대변위 는 10mm, 20mm, 40mm 그리고 55mm로 증가시키면서 각각 10회씩 반복하여 실험을 수행하였다. 면진장치의 순고무높이가 40mm 이므로 더 큰 변위에 대한 실험을 수행할 수도 있으나 워낙 소규 모의 고무베어링이므로 이와 같이 결정하였다. 실험에 사용한 하중의 수평방향 변위-시간이력은 그림 5에 도시하였다. 그림과 같이 NRB와 HDRB에 대하여 각각 400초 동안의 가진에 의하여 면 진장치의 기계적 특성을 평가하도록 하였다.



3.2.2 연직방향 가진 시험

선정된 고무베어링은 연직방향 하중에 대한 특성시험을 수행하여 연직강성을 비교해 보았다. 연직방향 특성시험은 일본면진구조협회가 발간한 「면진부재 JSSI규격^[11]」의 기준에 따라 실험을 수행하였다. 기준에 따르면 연직방향 특성시험의 경우는 연직하중이 없는 상태에서부터 설계하중 의 30% 증가한 하중까지 서서히 증가시킨 후에 설계하중의 ±30%범위의 하중을 3cycle 반복재하 함으로서 연직강성을 측정하도록 하고 있다. 따라서 본 시험체의 경우는 설계하중이 400kg 이므 로 520kg에서 380kg까지 3회 반복재하하여 실험을 수행하였다.

3.3 FPS

FPS의 경우는 고무베어링과는 달리 가진주파수에 의하여 면진장치의 기계적특성이 변화하는 것 이 아니고 가진 속도에 의하여 달라지므로 가진속도를 일정하게 한 상태에서의 실험을 수행하였 다. 본 실험에 사용한 FPS는 마찰면의 반경이 50mm로 설계되었으나 마찰재의 반경을 고려하여 최대변위를 30mm까지 적용하여 시험을 수행하였다. 가진속도를 2mm/sec, 4mm/sec, 20mm/sec, 40mm/sec 그리고 80mm/sec으로 변화하면서 시험을 수행하였다. 각 실험경우별로 실험방법은 다 음의 표 1에 정리하였다. 표에서 case 4의 경우 변위를 변화시키면서 속도를 가장 크게 하여 실 험을 한 것은 실험장치의 특성상 가진속도가 증가하면 일정한 수직하중을 유지하는 것이 어렵기 때문에 FPS의 손상이 발생할 것을 우려하여 실험순서를 결정하였기 때문이다.

시험경우	변위 (mm)	주파수 (Hz)	주기 (초)	속도 (mm/sec)	Cycle
Case 1	10	0.05 0.1 0.5 1	20 10 2 1	2 4 20 40	5 10 10 10
Case 2	20	0.025 0.05 0.25 0.5	40 20 4 2	2 4 20 40	5 5 10 10
Case 3	30	0.0167 0.033 0.167 0.333	60 30 6 3	2 4 20 40	5 5 10 10
Case 4	10 20 30	2 1 0.667	0.5 1 1.5	80 80 80	10 10 10

표 1. FPS의 특성시험 방법

4. 시험결과 및 분석

4.1 NRB와 HDRB

4.1.1 수평방향 가진 시험

NRB와 HDRB의 수평방향 특성시험결과의 변위-하중관계는 그림 6에 각각 도시하였다. 그림에 서 보는 바와 같이 동일형상의 면진장치에서 고무의 감쇠특성이 달라졌을 때 수평하중에 대한 변 위-하중 이력곡선이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 우선 면진장치 순고무높이가 40mm 임에 도 수평변위가 40mm에 도달했을 때 경화현상이 시작되는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 고 무계 베어링이 200%변형에서 경화현상이 발생하는 것과 비교하면 적은 변형만을 허용하는 결과이 며, 제작된 면진장치가 매우 소형이므로 발생하는 결과인 것으로 판단된다. 또한 이력곡선의 면 적이 HDRB가 상당이 크게 평가되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 큰 감쇠값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 변위가 커짐에 따라서 NRB와 HDRB의 차이가 감소하는 것을 알 수 있지만 적은 변 형에서는 감쇠값이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 변형이 적게 발생하는 경우에 HDRB의 고감쇠특성이 더 크게 평가될 수 있다는 것을 의미한다. 또한 HDRB는 NRB에 비하여 초기강성이 미소하나마 크게 평가되는 반면 2차강성은 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 저중량 기기에 적용하기에 적합한 것으로 판단된다.



그림 6. 고무베어링의 수평전단시험에 의한 변위-하중 곡선

또한 그림에서 보는 바와 같이 변형률이 증가할수록 면진장치의 특성시험 결과가 기존의 면진 장치 특성시험에서 나타났던 변위-하중 이력곡선과는 다른 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 변형률이 100%정도인 경우부터는 하중의 증가없이 변위가 증가하는 모습을 보이는 것을 알 수 있 다. 이것은 제작된 고무베어링의 형상이 일반적인 고무베어링과는 다른 모습을 보이기 때문이며 그에 의해서 전단변형이 아닌 휨변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

고무베어링의 거동특성을 결정짓는 형상계수는 고무 한 층의 높이 및 전체층의 높이 그리고 하 중을 받는 면적에 의하여 결정된다. 본 연구에서 사용한 것과 같은 중공형 고무베어링의 경우 한 층의 고무를 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.



그림 7. 적층 고무

그림에서 D는 고무의 외경을 나타내고 d는 내경, 그리고 t는 고무 한층의 두께를 나타내고 있다. 이러한 경우 고무베어링의 1, 2차 형상계수인 S₁과 S₂는 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_1 = \frac{D-d}{4 \cdot t} \tag{3}$$

$$S_2 = \frac{D-d}{n \cdot t} \tag{4}$$

일반적으로 1차 형상계수는 20-35의 값을 갖는 것이 좋고, 2차형상계수는 5이상의 값을 갖는 것이 효과적인 전단변형을 하는데 유리한 것으로 알려져 있다^[12]. 그러나 본 연구에서 사용한 고무베어 링의 경우 윗식에 적용하여 각각의 형상계수를 구해보면 각각 0.65 와 0.5의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 인해서 변형률이 증가할 경우 전단변형이 아닌 휨변형이 발생하여 그 립 6과 같은 이력곡선으로 나타나게 된 것이다. 실제로 실험시 55mm의 변위가 발생했을때의 모 습은 그림 8에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고무베어링의 휨거동이 발생하는 것을 명확 하게 알 수 있다.



그림 8. 특성시험시 고부베어링의 변형모습

4.1.2 연직방향 특성시험

다음으로 고무베어링의 연직하중에 따른 실험을 실시하여 연직강성을 평가하였다. 실험결과는 그림 9에 도시하였다. 전술한 실험방법에 의해 수직하중을 2.8kN에서 5.2kN까지 변화시키면서 3 회 반복한 실험결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일 하중에 대해서 HDRB가 더 큰 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 수직강성 역시 HDRB가 NRB에 비하여 상대적으로 적게 평가되는 것 을 알 수 있다. 이것은 면진장치로서의 약점으로 평가될 수도 있지만 대상으로 하는 기기가 저중 량이므로 기기면진시는 큰 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다. 이력곡선에 잡음이 많이 들어간 것은 발생하는 변위가 매우 작음으로 인해 발생한 것이나 전체적인 거동을 판단하는 데는 큰 문 제가 없는 것으로 판단된다.



4.2 FPS

표 1에서 제시한 바와 같은 방법에 의하여 4가지 경우에 대한 FPS 특성시험을 수행하였다. 각 case 에 따른 FPS의 변위-하중 이력곡선은 그림 10에 모두 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각 경우별로 속도가 증가함에 따라 이력곡선의 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 10(a)의 경우는 최대변위를 10mm로 고정하고 속도를 증가시키면서 실험을 수행한 것으로 일반적인 FPS의 특성시험결과와 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 그림 10(b)부터는 변위가 증가함에 따라 수평하중이 급격하게 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 속도가 작거나 변위가 작 을 경우에는 발생하지 않지만 변위가 20mm이상이고 속도가 20mm/sec가 넘어설 경우 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 것은 두가지 원인에 기인한 것으로 볼 수있 다. 첫 번째는 본 실험에서 사용한 FPS는 일반 구조물에 사용하는 것과 달리 마찰면의 곡률반경 이 24.8cm로서 매우 작은 곡률을 가진다. 따라서 변위가 증가할 경우 마찰면에서의 횡방향 분력 이 크게 증가하므로 마찰만에 의한 저항력에 비하여 수평하중이 크게 평가되는 것이다. 이러한 부분은 FPS 마찰면의 곡률과 실제 거동과의 상관관계에 대한 추후 연구가 필요한 것으로 판단된 다. 두 번째 이유로 본 실험에서는 상재하중을 400kg으로 결정하여 실험을 수행하였는데 사용한 유압 가력기가 속도가 증가할 경우 일정한 수직하중으로 유지시켜주는 것이 기계적으로 불가능하 기 때문에 속도가 빨라지고 변위가 증가할때는 수평하중이 더 크게 평가되는 것이다. 이러한 특 징은 그림 10(d)의 경우 가장 명확하게 볼 수 있다. 그리 10(d)의 경우는 속도를 80mm/sec으로 고 정하고 변위를 10mm, 20mm, 그리고 30mm로 증가시키면서 실험을 수행한 경우이다. 따라서 일 반적인 실험에서 볼 수 없는 변위-하중 곡선이 나타나게 된 것으로 판단된다. 따라서 곡률이 작 은 FPS의 설계와 해석에 있어서는 이러한 영향을 고려하여야 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



6. 결론

본 연구에서는 마찰진자형 베어링(FPS)과 천연고무 베어링(NRB) 및 고감쇠고무 베어링(HDRB) 의 3종류의 면진장치를 소규모 기기의 면진에 사용할 수 있도록 제작하였으며 제작된 면진장치의 특성시험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- NRB와 HDRB에 대한 특성시험 결과 HDRB의 감쇠비가 NRB의 경우에 비해 크게 평가되는 것을 알 수 있었다. 변형률이 큰 경우에는 두 경우의 차이가 감소하지만 그래도 감쇠비가 NRB에 비해서 크게 나타나므로 저중량의 소형기기면진에는 HDRB를 사용하는 것이 큰 효과적을 수 있음을 알 수 있었다.
- 형상계수가 너무 작은 고무베어링의 사용은 올바른 전단변형을 저해하고 휨변형에 의한 거동을 유발시킬 수 있는 것으로 나타났다. 변형률이 작은 경우에는 이러한 영향이 감소하지만 변형 률이 큰 경우에는 휨변형에 의한 거동이 두드러지게 나타나므로 기기면진시 이러한 영향에 대 한 세심한 검토가 필요한 것으로 판단된다.
- FPS에 대한 특성시험 결과 마찰면의 곡률반경이 작을 경우 PTFE의 마찰에 의한 저항에 수평분 력에 의한 저항이 추가되면서 동일 변형에 대해 수평하중이 크게 평가되는 것을 알 수 있었다.
 따라서 소규모 FPS의 설계시는 마찰면 곡률에 의한 영향을 검토하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구인 "구조물 건전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 특성시험을 수행한 한국기계연구원과 면진장치를 제작한 (주)케이알에 감사드립니 다.

참고문헌

- 1. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박칠림, "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가," 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제4호, 1998, pp. 53-62.
- 유봉, 이재한, 구경회, 권혁신, "금속로 면진설계를 위한 축소규모 납삽입 및 3차원 면진베어링 의 특성시험 결과분석," "KAERI/TR-1362/99, 한국원자력연구소, 1999.
- 전영선, 최인길, 유문식, "수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평 가," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제6호, 2001, pp. 1-10.
- 4. Hwang, J.S. and Ku., W, "Analytical Modeling of High Damping Rubber Bearings," Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 8, August 1997.
- 5. Watanabe, Y., Kato, A., Somaku, T., Umeki, K. and Sato, N., "Table Test and Analysis on Base

Isolated FBR Plant Model with High-Damping Rubber Bearing," 12WCEE, 2000.

- Abe, M., Fujino, Y. and Yoshida, J., "Dynamic Behavior and Seismic Performance of Base-Isolated Bridge in Observed Seismic Record," 12WCEE, 2000.
- Zayas, V., Low, S., Bozzo, L. and Mahin, S., "Feasibility and Performance Studies on Improving the Earthquake Resistance of New and Existing Buildings Using the Friction Pendulum System," UCB/EERC-89/09, University of California, Berkeley, 1989.
- 김영중, 허영철, 김병현, "마찰진자형 면진베어링의 특성연구," 한국지진공학회 2000년도 추계 학술발표회 논문집, 2000.
- 9. 이경진, 김갑순, 서용표, "FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가," 2003 춘계학술 발표회 논문집, 한국원자력학회, 2003.
- 10. 김대곤, 김우범, 서용표, 문대식, 김종엽, "FPS로 면진된 원전 주제어실의 내진성능 평가," 한국지진공학회 2003년도 추계학술발표회 논문집, 2003.
- 11. 일본면진구조협회, 면진부재 JSSI 규격, 1997.
- 12. 일본면진구조협회, 면진적층고무입문, 1997.