

마찰진자형 면진베어링의 특성 연구

A study on the characteristics of friction pendulum isolation bearings

김영중*
Kim, Young-Joong

허영철*
Huh, Young-Cheol

김병현**
Kim, Byung-Hyun

ABSTRACT

The friction pendulum type seismic isolation system (FPS) has been developed to provide a simple and effective way to achieve earthquake resistance for buildings. The major advantages are: the isolation frequency can be easily achieved by designing a curvature of the surface and does not depend on the supported weight of a structure. The function of carrying vertical load is separated to the function of providing horizontal stiffness. Next the friction provides sufficient energy dissipation to protect the structure from earthquake response and resistance to the weak external disturbances such as wind load and ground vibrations due to traffic. In this paper, the friction coefficients are evaluated from number of experiments on the FPS test specimens. The relations between friction coefficient and the test waveform, velocity, and pressure are reviewed and further works are discussed.

1. 서 론

지진에 의한 구조물의 손상을 방지하기 위하여 구조물의 하부에 면진장치를 도입하는 것이 세계적인 추세이다. 가장 많이 적용되고 있는 것은 적층고무 베어링의 중앙부에 납봉을 삽입함으로써 적층고무 베어링의 저감쇠에 따른 단점을 보완한 납삽입 베어링(LRB, Lead Rubber Bearing)이라고 할 수 있다.

납삽입 베어링은 적층고무의 낮은 강성에 따른 진동절연 효과와 납봉의 높은 에너지 흡수 성질 및 납봉의 높은 초기 강성에 의해 풍 또는 교통하중 등에 의한 강도가 낮은 외부 교란에 대한 저항 능력 등 설계 조건상 매우 좋은 성질을 갖고 있으며, 제작 공정이 비교적 단순하고 비용이 저렴한 장점을 보인다.

그러나 고무가 가진 기본적인 단점, 즉 경년 경화에 따른 특성의 변화 및 내구성 저하뿐만 아니라 강성의 비선형성과 납의 변형에 따른 용융 및 재결정화 과정에 의한 강성의 변화 등 지진응답 예측을 위한 설계에 많은 불확실한 인자들이 존재하고 있다. 또한 과도한 변형시 수직하중의 의한 좌굴도 우려되어 구조물의 최저차 고유진동수를 어느 한도 이하로 낮출 수 없으며, 액체저장 탱크와 같이 재하 하중이 일정치 않은 경우는 최저차 고유진동수가 하중의 크기에 따라 변하기 때문에 효과적인 면진주파수를 설정하기 어려운 점도 있다.

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원, 정회원

** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 책임연구원, 정회원

이에 따라 최근 진자의 성질을 응용하여 구조물의 최저차 고유진동수를 결정할 수 있는 면진장치들이 개발되고 있다. 즉 진자의 특성상 고유진동수를 재하 하중에 관계없이 일정하게 설계할 수 있으며, 감쇠에너지를 동시에 고려하여 지진에 의한 구조물의 동적응답을 감소시키도록 하고 있다. 이중 대표적인 것으로서 구면을 따라 구조물의 지지부가 움직이도록 하고 접촉부에 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 수지를 삽입한 마찰진자 베어링(FPS, Friction Pendulum Bearing) 및 접촉부에 볼 베어링을 이용한 TEKTON N-Bearing 등이 있다.

PTFE는 Teflon 계열의 합성수지로서 마찰계수가 작고 내열성 및 내식성, 내구성이 우수하여 이미 많은 분야에서 응용되고 있다. PTFE를 면진장치에 응용한 연구는 1980년대 초에 시작하여 평면판의 사이에 PTFE를 삽입하여 수직하중을 지지하도록 하고 다른 복원장치 및 감쇠장치를 도입한 것으로서 Alexisison[1], R-FBI(Resilient Friction Base Isolation System)[2] 등의 연구 및 교량받침으로서 국내에서도 제작되어 많이 응용되고 있다.

마찰진자 베어링은 복원력을 마찰판의 곡률에 따라 발생하도록 고안된 것으로서 Zayas 등[3]에 의해 실용화되어 있다. 이 시스템의 장점은 수직하중의 지지능력과 수평 복원강성이 서로 독립적이어서 대변형에 따른 좌굴 발생의 우려가 없고 안정적으로 구조물을 지지할 수 있으며, 곡률을 임의로 설계할 수 있기 때문에 고유진동수를 가능한 한 낮게 설정할 수 있다. 다만 이 경우 수평 복원력이 마찰력에 비해 지나치게 낮으면 복원성을 상실할 우려가 있다. 따라서 마찰계수의 결정이 매우 중요한 관점이 된다.

Mokha 등[4]은 광범위한 연구를 통하여 PTFE와 마찰재의 변화에 따른 특성을 연구한 바 있으며, 미국의 Buffalo 소재 뉴욕주립대학(SUNY)의 MCEER을 중심으로 마찰진자 베어링을 응용한 활발한 연구가 진행되고 있다[5,6].

이들 연구에 따르면 마찰력은 마찰면의 속도와 압력에 크게 의존하는 것으로 나타났으며, 이 특성을 고려한 마찰진자 베어링의 수학적 모델링 기법도 제안하고 있다. 그러나 실험 결과가 평면 마찰면에서 시험한 결과이기 때문에 실제 구조물에서 전도모멘트(Overturing Moment)에 따른 수직 하중 변화 효과와 곡률을 갖는 마찰진자 베어링의 거동 등을 확인할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 실제의 마찰진자 베어링을 제작하고, 여러 성분의 PTFE를 성형한 마찰재를 대상으로 특성 시험을 통해 마찰진자 베어링의 성능을 파악하는 절차를 제시하고자 한다. 우선 마찰면이 거친 시험체와 마찰면의 조도를 일정 한도로 제작한 시험체에 대하여 수직하중과 수평 속도를 변화시키며 일련의 시험을 수행하였다. 또한 시험과형을 삼각파와 정현파로 구분하여 히스테리시스 곡선의 차이를 분석하였으며, PTFE의 성분에 따른 차이점도 비교하였다.

2. 마찰진자 베어링 특성시험

2.1 시험편

PTFE를 이용한 마찰베어링의 주요 특성은 표 1과 같이 여러 기관에서 규격화하고 있다[5].

본 논문에서 이용한 시험편은 마찰면의 조도가 평균값(R_a)으로 $5 \mu\text{m}$ 이고 압축하중은 25 MPa를 기준으로 제작되었다. 곡률반경은 0.1589 m이고, PTFE 마찰재의 반경은 30 mm, 두께는 3 mm이다. 표 1의 기준과 비교하면 시험편의 조도가 매우 큰 것을 볼 수 있는데 본 논문에서는 제작 비용을 감안하여 우선적으로 정성적인 분석을 시도하였기 때문이며, 정량적인 결과는 평면 마찰판의 시험결과로부터 유추할 수 있다. 마찰재의 성분은 우선 순수 PTFE(Unfilled PTFE), Carbon 혼합형 및 Graphite 혼합형 등 3종을 대상으로 하였다. 그림 1에서 시험편의 주요 치수와 제작된 형상을 볼 수 있다. 한편 PTFE의 마찰력 특성만을 고찰하기 위하여 조도가 $0.3 \mu\text{m}$ 로 제작된 평면판에서도 시험을 수행하였다. 이는 표 1의 AASHTO 규격을 만족하고 있다.

표 1: Specification for Sliding Teflon Bearings

Specification	Type of Teflon	Type of Stainless Steel	Maximum Surface Roughness (μm)	Maximum Bearing Pressure (MPa)	Maximum Coefficient of Friction
AASHTO	Unfilled, filled, woven	ASTM A240, type 304	0.5 RMS (R_q)	13.8-24	0.04-0.12*
Standard spec. of the State of New York	Unfilled glass filled at 15%	ASTM A167 or ASTM A240, type 304	Degree number 8, 10 (0.25) RMS (R_q)	Not specified	Based on experiment
California Standard Special Provision	Unfilled	ASTM A240, type 304	0.076 RMS (R_q) plus lubrication	Not specified	Based on experiment
Ontario Bridge Design Code	Unfilled and filled	ASTM A167, type 304 or better	0.25 AA CLA (R_a)	30-45	0.03-0.12*
OPSS 1203	Unfilled with lubrication	ASTM A167, type 304 or better	0.25 AA CLA (R_a)	30-45	0.03-0.06*
BS5400	Unfilled and filled	Grade 316 S16 BS970, BS1449	0.15 AA CLA (R_a)	30-45	0.03-0.16*
DIN4141, part 12	Unfilled and possibly filled	High-quality pollution resistant	Unknown, polishing and lubrication	60 under certain conditions	Based on experiment

*Depending on type of Teflon, lubrication, and pressure

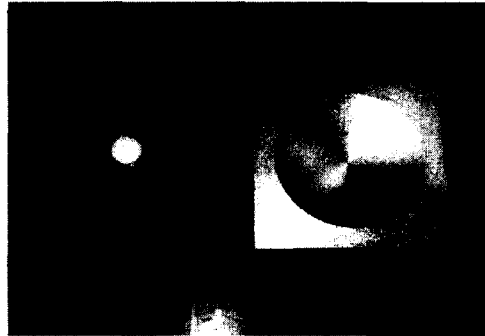
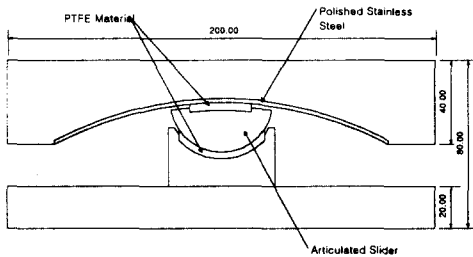


그림 2: Friction pendulum bearing system

2.2 시험장치

시험장치의 수직하중을 가한 상태에서 수평변위를 가할 수 있도록 제작하였다. 그림 2와 같이 수직 액추에이터에서 하중을 제어하고, 수평 액추에이터는 변위 파형을 제어하게 된다. 수직 액추에이터의 하부와 시험편과의 사이에 3축 로드셀 및 변위계를 설치하여 수직, 수평 방향의 하중과 변위를 모두 측정하였다.

시험장치의 용량은 수직, 수평 모두 하중 10 ton, 변위 ± 75 mm이며, 액추에이터의 용량을 바꾸어 설치하여 시험 가능 범위를 조절할 수 있도록 제작하였다. 한편 시험편의 회전을 방지할 수 있도록 수직 액추에이터 하부에 나비형 판을 설치하고 좌우에는 선형 베어링을 설치하였으며, 시험편의 하부도 선형 베어링이 장착된 판 위에 설치되도록 하였다.

그림 3에서 시험기의 전경을 볼 수 있으며, 그림 4는 마찰진자 베어링의 시험 장면이다.

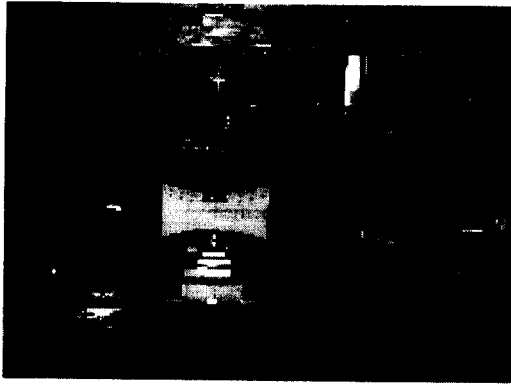


그림 3: 시험기

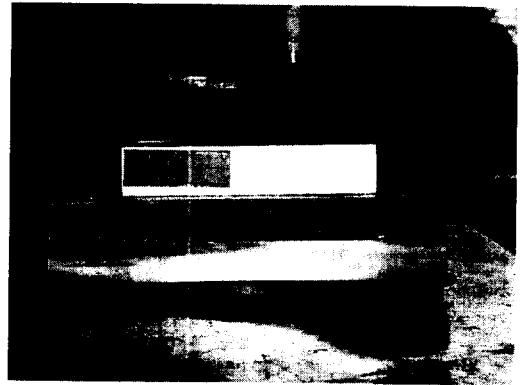


그림 4: 마찰진자 베어링 시험

2.3 시험방법

시험편에 작용하는 압축하중의 변화를 관찰하기 위하여 압축 압력을 설계압력인 25 MPa를 기준으로 17.5 MPa(70%), 10 MPa(40%)의 3단계로 적용하였다.

마찰면의 속도에 따른 영향은 진폭 45 mm를 기준으로 주파수를 달리하며 시험하였다. 주파수가 0.00556 Hz부터 0.03333 Hz, 0.06667 Hz, 0.2 Hz, 0.4 Hz, 0.66667 Hz 등으로 달라지면 삼각파를 적용할 때 속도는 각각 1, 6, 12, 36, 72, 120 mm/s에 해당한다.

한편 시험파형은 삼각파와 정현파로 각각 적용하였다.

시험 과정에서 마찰재의 표면이 박리되어 마찰판에 접촉되는 현상이 발생하면 표면을 에틸 알코올로 세척하여 초기 상태를 유지토록 한 후 시험을 진행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 히스테리시스 곡선

시험결과 계측된 히스테리시스 곡선의 주요 특징을 살펴보면 그림 5와 같이 매우 저속도로 삼각파형을 주어 시험한 결과는 변위가 증가할수록 하중이 약간 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 전체적인 기울기는 제작된 마찰판의 곡률과 인가된 수직하중에 따라 결정되는 강성의 기울기를 잘 보여주고 있다. 그러나 하중이 증가할수록 마찰력이 증가함을 볼 수 있다. 즉, 마찰계수가 거의 일정함을 고려할 때 수직하중을 제어한 상태에서 수평하중이 증가하므로 결과적으로 압축하중이 증가하게 되어 마찰력이 증가하게 된다. 또한 마찰판의 곡률을 따라 수평방향으로 일정한 속도로 제어되었기 때문에 마찰판의 표면을 따라 움직이는 속도는 접선방향 성분이 되므로 변위의 절대값이 증가하면 마찰면의 속도가 증가하게 된다. 따라서 변위가 작을 때는 접선방향 속도가 크게 변하지 않으나 곡률이 본 시험편과 같이 작은 경우는 변위가 커지면 마찰 속도의 변화가 커지게 된다. 본 논문에서 고찰하게 되는 속도와 마찰력의 관계에서 볼 때 속도가 작을 때는 마찰력의 변화가 크므로 이 결과와 같이 속도가 매우 작은 범위에서 증가하면 마찰계수의 증가율이 매우 크므로 발생한 결과로 보인다.

한편 최고속도가 12mm/s인 정현파로 시험한 결과중 하나를 그림 6에서 볼 수 있다. 이 결과는 삼각파형의 경우와 같이 변위가 작을 때는 마찰력이 증가하지만 변위가 어느 정도 이상이 되면 마찰력이 거의 일정하게 되는 것을 볼 수 있다. 수평변위가 정현파로 움직이면 속도는 변위가 0일 때 가장 크고, 절대 변위가 증가하면서 절대 속도가 작아지게 되므로 마찰계수가 감소하게 된다.

즉 변위가 증가하면서 압축력이 증가하여 마찰력이 커지나 마찰계수가 작아지므로 전체적인 마찰력은 거의 일정한 값을 보이게 된다.

그림 7은 동일한 최고 속도를 갖도록 설정된 5종의 정현파의 변위를 20%씩 증가시키며 측정한 결과이다. 또한 동일한 조건에서의 삼각파형 시험 결과를 비교하였다. 이를 보면 변위 진폭에 관계없이 히스테리시스 곡선은 동일한 경로를 추종하고 있음을 알 수 있다. 즉 히스테리시스 경로의 최외각 곡선에 대한 정의만으로도 변위 변화에 따른 추정이 가능함을 알 수 있다. 정현파 시험 결과의 최외각선과 삼각파형 시험결과를 비교해 보면 앞서 고찰한 바와 같이 변위가 커지면 서로간의 차이가 약간 발생하나 변위가 작은 부분에서는 완전히 일치하고 있음을 볼 수 있다.

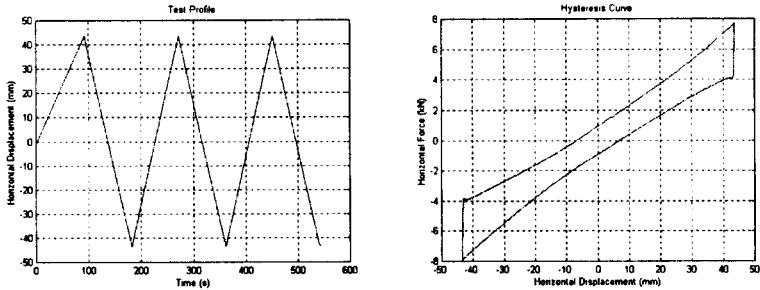


그림 5: Hysteresis Curve of the Unfilled PTFE
(Average Pressure=25MPa, Velocity=0.97mm/s, Amplitude=45mm)

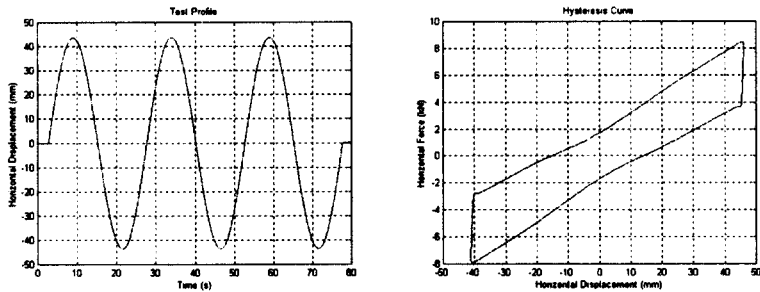


그림 6: Hysteresis Curve of the Unfilled PTFE
(Average Pressure=25MPa, Velocity=12mm/s, Amplitude=45mm)

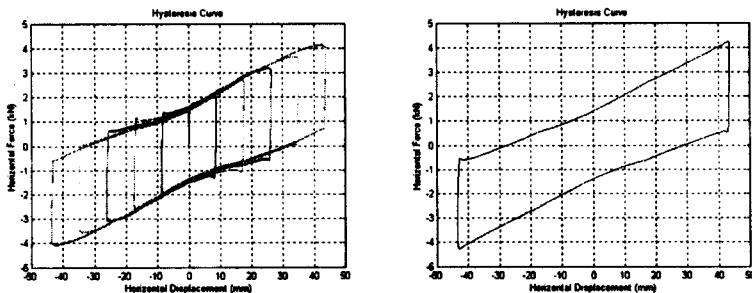


그림 7: Hysteresis Curve of the PTFE with Graphite
(Average Pressure=10MPa, Velocity=12mm/s, Waveform: Sine(left) or Triangle(right))

3.2 속도의 영향

압축압력이 8 MPa인 경우 여러 속도에서 측정된 히스테리시스 곡선으로부터 마찰계수를 추정하여 그림 8에 정리하였다. 마찰계수는 변위에 따라 변하므로 일정한 대표값을 취하기 위해 변위가 0점을 통과하는 시점의 수직하중과 수평하중을 비교하여 구했다.

속도가 작을 때는 마찰계수가 급격히 변하고 어느 정도 이상의 속도가 되면 마찰계수가 일정한 값을 유지함을 볼 수 있다. 시험결과 마찰계수는 Unfilled PTFE의 경우 최대 0.1정도이나, Carbon 또는 Graphite 혼합형 PTFE는 이보다 2배이상의 최대 마찰계수를 보이고 있다. 이는 마찰면의 조도가 크기 때문에 발생하는 박리현상이 강도가 강한 혼합형 PTFE에서 많이 발생하여 수평력으로 작용하였기 때문으로 보인다.

그림 8의 곡선으로부터 다음과 같이 속도(\dot{U})에 따른 마찰계수의 관계식을 추정할 수 있다. 여기서 f_{max} 는 마찰계수가 수렴하는 속도가 큰 부분의 값이고, f_{min} 은 속도가 매우 작을 경우의 마찰계수를 의미하며, a 는 곡선의 변화량을 결정하는 상수이다.

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min})\exp(-a|\dot{U}|) \quad (1)$$

그림 9는 표면 조도가 $0.3 \mu\text{m}$ 인 평면판에서 Unfilled PTFE로 시험하여 구한 마찰계수를 정리한 것이다. 이를 보면 마찰계수가 0.01부터 0.12정도까지 곡선을 따라 매우 잘 형성되고 있음을 볼 수 있다. 그림 8과 비교하면 압력이 약 2.7배에 달함에도 저속에서의 마찰계수가 매우 작음을 볼 수 있고 이 결과는 Mokha 등의 시험 결과와 잘 일치하고 있다.

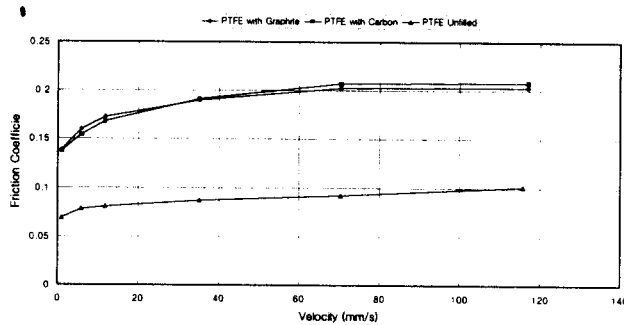


그림 8: Friction Coefficient at Constant Pressure of 10 MPa (Surface Roughness $5 \mu\text{m}$)

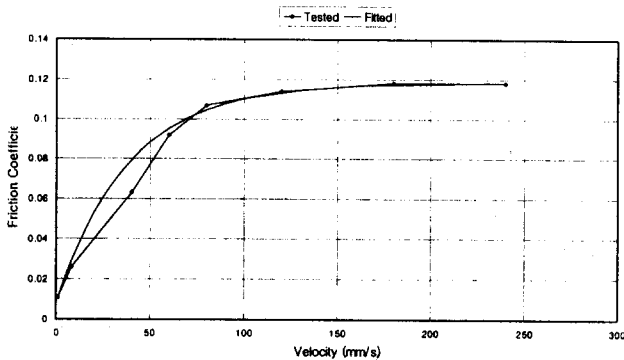


그림 9: Friction Coefficient at Constant Pressure of 27 MPa (Surface Roughness $0.3 \mu\text{m}$)

3.3 압력의 영향

그림 10은 압축압력이 10, 17.5, 25 MPa인 경우 속도 12 mm/s인 상태에서 평가된 마찰계수를 정리한 것이다. 이를 보면 압력의 변화 조건이 부족하여 엄밀한 경향은 추출할 수 없지만 마찰계수가 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그림 11은 표면조도 0.3 μm 인 평면판에서 Unfilled PTFE에 대해 속도 100 mm/s로 시험한 경우의 결과인데 역시 압력에 반비례하는 마찰계수의 특성을 볼 수 있다.

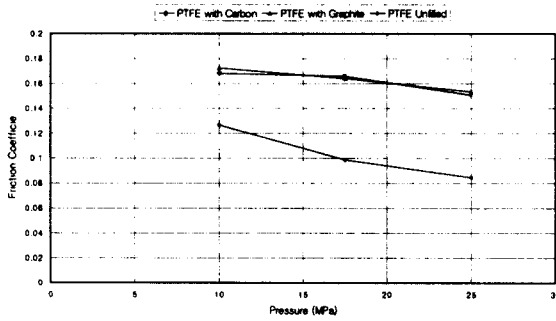


그림 10: Friction Coefficient of Unfilled PTFE at Constant Velocity of 12 mm/s (Surface Roughness 5 μm)

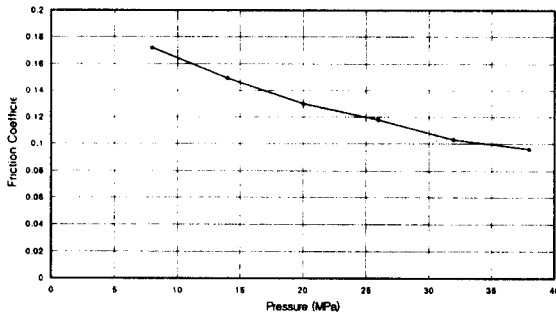


그림 11: Friction Coefficient of Unfilled PTFE at Constant Velocity of 100 mm/s (Surface Roughness 0.3 μm)

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 마찰진자 베어링의 히스테리시스 곡선은 일정한 수직하중 조건에서 일정한 수평속도로 마찰판의 중심으로부터 절대 변위가 증가하면 마찰력이 증가하는 현상을 보인다. 이는 압축력의 증가, 마찰속도의 증가에 따른 것이며, 압축력이 증가하며 발생하는 마찰계수의 감소효과보다는 큰 영향을 준다.

2) 정현파로 수평변위를 제어한 경우의 히스테리시스 곡선은 삼각파로 제어한 결과에 비해 마찰력의 크기가 비교적 균일하다. 이는 절대 변위가 증가하면 압축압력의 증가에 따른 마찰력의 증가

경향과 속도가 감소함에 따라 함께 감소하는 마찰계수의 경향이 서로 상쇄 효과를 가져오기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 진동과 같이 조화파로 응답하는 경우 수직하중이 거의 일정하다면 변위 증가에 따라 감소하는 속도에 따른 마찰계수를 고려하는 것보다는 일정한 마찰계수를 유지하는 것이 해석적인 측면에서 타당할 수 있다. 이는 추후 실제 구조물에 적용한 실험과 해석적인 수학적 모델 개발을 통해 보다 자세히 관찰해야 할 필요가 있다.

3) 마찰계수는 속도가 증가함에 따라 저속에서는 급격히 증가하여 고속이 되면 일정한 값으로 수렴하는 성질을 보인다. 다만 표면 조도가 크면 이 효과가 작아져서 마찰력의 변화량이 작아진다.

4) 마찰계수는 압축압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

5) 본 연구를 통해 마찰진자형 면진베어링의 히스테리시스 곡선의 특진 및 마찰계수의 변화에 영향을 주는 속도와 압력의 관계 등을 살펴보았다. 실험의 양이 부족하고, 시험체의 제작 여건상 보다 정량적인 경향을 분석할 수는 없었지만, 정성적인 경향은 살펴볼 수 있었다. 추후 시험체를 보완 제작하고 실제 구조물에의 적용 시험 등을 통해 보다 완성된 결과를 제시할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 지원하에 국가지정연구실 사업으로 추진 중인 “제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발”과제의 일환으로서 수행되었다.

참고문헌

1. Ikonomou, A., S. (1985), "Alexisismon isolation engineering for nuclear power plants," Nuclear Engrg. and Design, 85(2), 201-216.
2. Mostaghel, N. and Khodaverdian, M. (1987), "dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI)," Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics, 15(3), 379-390.
3. Zayas, V., Piepenbrock, T. and Al-Hussaini, T. (1993), "Summary of Testing of the Friction Pendulum Seismic Isolation System : 1986-1993," Proc. ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, Applied Technology Council, San Francisco.
4. Mokha, A., Constantinou, M., and Reinhorn, A. (1989), "Teflon Bearings in Base Isolation. I: Test," ACSE, J. of Structural Engineering, 116(2), 438-453.
5. Mokha, A., Constantinou, M., and Reinhorn, A. (1990), "Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of a Sliding Isolation System with a Spherical Surface," Technical Report NCEER-90-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo.
6. Al-Hussaini, T.M., Zayas, V.A. and Constantinou, M. (1994), "Seismic Isolation of Multi-Story Structures Using Spherical Sliding Isolation Systems," Technical Report NCEER-94-0007, National Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo.