

FPS 면진장치의 기계적 특성에 관한 실험적 평가

Experimental Evaluation of Mechanical Property for FPS isolation bearings

이경진, 김갑순, 서용표

한전 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

마찰진자 베어링 시스템은 상부 구조물과 바닥면의 사이에 횡강성과 에너지 흡수력을 유발함으로써 지진 격리효과를 나타내게 된다. 여기서 마찰진자 베어링 상부의 구조물은 반지름 R 을 갖는 진자와 같이 거동하게 되며, R 은 반구형 마찰면의 곡률 반지름 값을 나타낸다.

마찰진자 베어링 시스템에는 두 가지 중요한 원리가 있는데, 첫째는 베어링은 높은 수직하중 지지력과 안정성을 갖는다는 것이고, 둘째는 베어링의 횡강성과 에너지 흡수력, 수직하중 지지력은 서로 독립적이라는 것이다.

본 연구에서는 가력속도, 수직압력, 입력파, 수평변위의 각 영향변수가 마찰진자 베어링의 마찰특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 일련의 실험을 수행하였다.

실험결과, 가력속도가 일정값까지 증가함에 따라 마찰계수는 증가하고, 수직압력이 증가함에 따라 마찰계수는 감소함을 알았다.

Abstract

The FPS isolation bearings produce the isolation effect by introducing flexibility and energy absorption capability at an interface between the structure and the moving ground. In this system, The structure on FPS bearing behaves as a pendulum of length R , where R is the radius of curvature of the spherical sliding surface.

There are two important advantages in friction pendulum systems; The bearings have high vertical load capacity and stability. The properties of flexibility, energy absorption capability and vertical load capacity are not interrelated.

In this study, A series of laboratory experiments has been conducted to determine the effect of sliding velocity, bearing pressure, test waveform, and horizontal

displacement on the frictional characteristics of FPS isolation bearings.

As a result, It is found that frictional coefficient increases with increasing velocity up to a certain value and frictional coefficient drops with increasing pressure.

1. 서 론

지진동이 구조물의 기초에서 상부로 전달되는 것을 최소화하기 위해 구조물에 면진장치를 도입하고 있다. 면진장치의 원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키고, 감쇠능력의 증가를 통해 지진에너지를 흡수, 분산시키는 개념이다.

면진장치 중에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 마찰진자(FPS : Friction Pendulum System) 베어링은 Zayas⁽¹⁾, Mokha, Constantinou⁽²⁾ 등에 의해 제안된 장치이다. 마찰진자 베어링은 진자의 성질을 이용하여 지진격리된 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있는 면진장치로서 마찰판의 곡률반경을 설계해서 재하하중에 관계없이 구조물의 고유진동수를 가능한 한 낮게 결정할 수 있고, 에너지 감쇠능력을 고려하여 지진동에 의한 구조물의 응답을 감소시키는 장치이다.⁽³⁾

마찰진자 베어링은 수직재하하중 지지능력과 수평방향 복원강성이 서로 독립적으로 작용하고 있어 급격한 파괴에 따른 안전장치를 고려하지 않아도 되기 때문에 구조물을 안정적으로 지지할 수 있다. 또한 지진동에 포함된 여러 진동수 성분에 영향을 작게 받기 때문에 상부구조물에 전달되는 지진력의 크기를 일정한 값으로 제한하므로 구조물의 응답을 감소시키게 된다.

Mokha⁽²⁾ 등에 의하면 마찰진자 베어링의 특성은 마찰판의 마찰계수에 크게 영향을 받으며 마찰력은 마찰면의 속도와 베어링의 압력, 마찰면의 표면상태에 좌우되는 것으로 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 마찰진자 베어링의 동적특성을 평가하기 위해 마찰진자 베어링을 직접 제작하여 수평 가력속도, 수직압력, 입력파형, 수평변위를 변화시키면서 시험을 수행하여 각 변수가 하중-변위 이력곡선, 마찰계수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 마찰진자 베어링의 원리 및 특성

마찰진자 베어링은 구형의 곡면(Sliding Surface)과 고압에 견딜 수 있는 재료로 만들어진 슬라이더로 구성되어 있다.

마찰진자 베어링은 곡면에서 수평방향으로 거동하고 동시에 에너지 흡수능력을 가짐으로써 면진효과를 나타내는 장치이다. 그림 1은 마찰진자 베어링의 기본원리를 나타낸 것

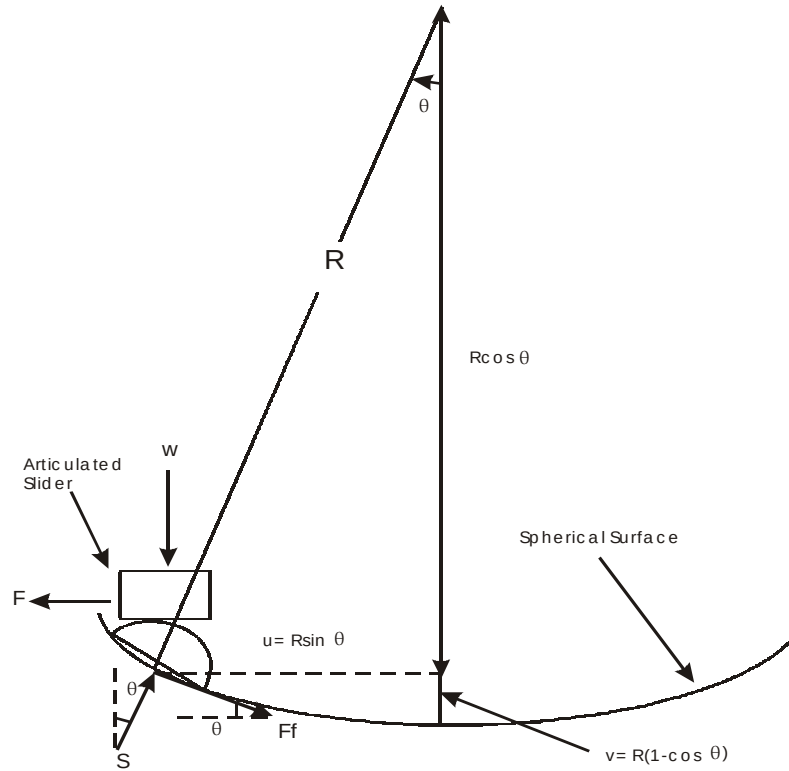


그림 1. 마찰진자 베어링의 기본원리

으로, 마찰진자 베어링 상부의 구조물은 반지름 R 인 진자처럼 거동하게 된다(여기서, R 은 구형 곡면의 곡률반지름). 마찰진자 베어링을 설계할 때, 수평방향 변위 u 는 $0.2R$ 이하로 설계되고 따라서, 각도 θ 는 작아지게 된다. 이 경우 수평변위 u 에서 수평방향력 F 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \sin(\dot{u}) \quad (\text{식 1})$$

(여기서, W : 수직재하하중, μ : 곡면 마찰계수, $\dot{u}$: 곡면에서의 속도)

또한, 마찰진자 베어링이 설치된 구조물의 고유진동수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)} \quad (\text{식 2})$$

식 2로부터 마찰진자 베어링의 고유진동수는 상부구조물의 질량과는 관련이 없고, 면진장치의 기하학적 형상(곡률 반지름)과 관련이 있음을 알 수 있다. 식 1로부터 마찰진자 베어링의 수평방향력은 수직 재하하중과 비례하고, 그림 1에서 수평방향 복원력 F_f 는 상부구조물의 질량중심 방향으로 발생하게 된다.

마찰진자 베어링은 곡면에서의 마찰력보다 작은 소규모 횡방향 지진력에 대해서는 거동을 하지 않고, 강성(Rigidity)을 나타내며, 수직재하하중 지지능력이 크고 안정성이 높은 구조형식 때문에 대변형시 P- Δ 효과를 나타내지 않는다. 고유진동수 변환과 관련된 수평방향 연성거동과 에너지 흡수능력은 서로 독립적으로 작용하는데 그 이유는 고유진동수는 곡면 반지름과 관련되고, 에너지 감쇠능력은 곡면의 마찰력에 좌우되기 때문이다.

3. 기계적 특성 평가시험

3.1 시험개요 및 시험체 제원

제작한 마찰진자 베어링은 마찰면 조도가 $0.3 \mu\text{m}$ 이고, 설계압축하중은 2 tonf, 곡률반경은 2.237m 이다. 곡면의 마찰재 성분은 순수 PTFE(Unfilled PTFE)이고, 마찰재 반경은 40mm, 지압면적은 12.566cm^2 이고 그림 2는 제작한 마찰진자 베어링과 도면을 나타낸 것이다.

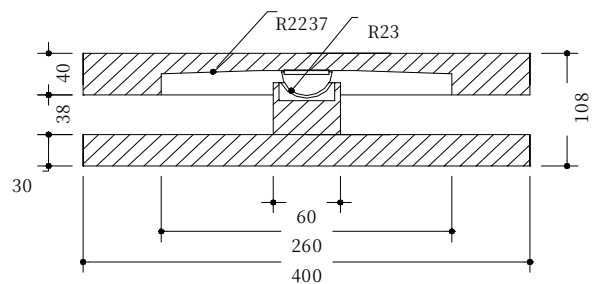


그림 2. 마찰진자 베어링

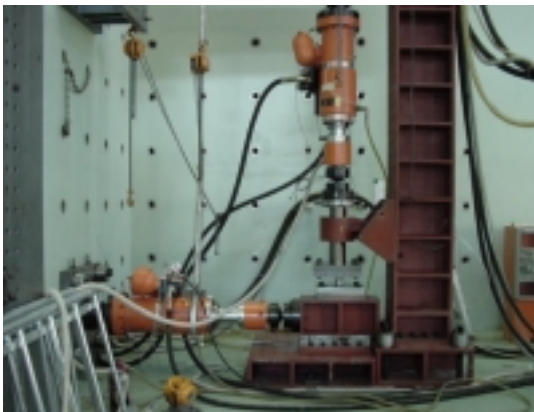


그림 3. 성능시험장치 및 시험전경

3.2 시험장치 및 시험방법

동적특성평가에 사용된 시험장치의 개념도 및 설치모습은 그림 3에 나타난 바와 같다. 시험장치는 수직/수평방향으로 각각 1대씩 설치된 2대의 유압가력기(Actuator)와 가력장치 설치를 위한 철골구조물로 구성되어 있다. 철골구조물은 상부 철골보를 통하여 반력벽과 일체를 이루게 설치하였다. 수직/수평방향 유압가력기의 최대용량은 각각 25tonf 이고, 최대 스트로크(Stroke)는 $\pm 250\text{mm}$ 이다. 시험 수행중에 면진장치의 상부판과 하부판이 평행을 유지하고 수직방향 재하하중을 충실히 전달할 수 있도록 하기 위하여 철골기둥 하부에 충분한 강성(Stiffness)을 가진 원통형 구조물(Cylinder)을 제작하여 고정시키고, 면진장치 하부에 철골 Jig Plate를 부착하였다. 하부 철골 Jig Plate에 수평방향 유압가력기를 부착하여 변형을 제어하고, Jig Plate 하부에는 슬라이딩 베어링(Sliding Bearing)을 설치하여 수평방향 가력시 마찰력을 최소화시켰다.

시험방법은 면진장치의 각 시험변수에 따른 영향을 평가하기 위해 수평변위 $\pm 50\text{mm}$ 를 기준으로 주파수를 0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 Hz 으로 변화시켜 시험을 수행하였다. 상부재하하중은 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 tonf로 변화시키고, 입력파형은 삼각파와 사인파를 적용하여 반복횟수를 5, 10, 50, 100회 수행하여 시험을 수행하였다. 또한, 시험은 마찰재와 마찰면의 기본적인 마찰특성을 파악하기 위한 평면판 마찰시험과 FPS 베어링의 구면 내에서의 실제 마찰특성을 파악하기 위한 구면판 마찰시험으로 구분하여 진행하였다.

4. 시험결과 및 분석

마찰진자 베어링의 기계적 특성은 마찰면의 마찰특성에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 각 영향변수가 Teflon 표면의 마찰특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 평면판과 구면판의 마찰시험 결과 측정된 시험체의 횡하중(마찰력)-변위 이력곡선을 그림 4~그림15에 나타내었다.

4.1 가력속도에 따른 마찰특성 비교

가력속도가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 수직하중을 1500, 2000, 2500, 3000kgf로 각각 일정하게 가력한 상태에서 최대가력속도를 3.14, 15.71, 31.42, 94.25, 157.08, 314.16mm/sec로 변화시켜가며 평면판 마찰특성실험을 수행하였다.(평균가력속도 : 2, 10, 20, 60, 100, 200mm/sec) 시험에 사용된 마찰면의 마찰재는 순수 PTFE(unfilled PTFE) 재질을 사용하였고, 시험방법은 일정수직하중을 가력한 상태에서 수평변위를 사인파의 형태로 제어하였다. 또한 진폭은 $\pm 50\text{mm}$ 로 일정하게 하되 가력 주파수를 0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0HZ로 설정하여 가력속도를 변화시켰으며 한 시험체에 대하여 5사이클을 반복재하하여 최대 마찰계수를 측정하였다.

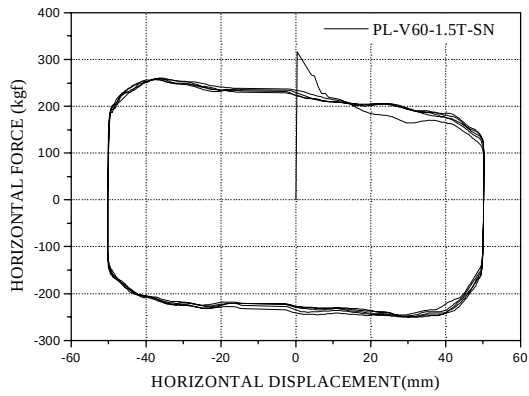


그림 4. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=1500kgf, SIN)

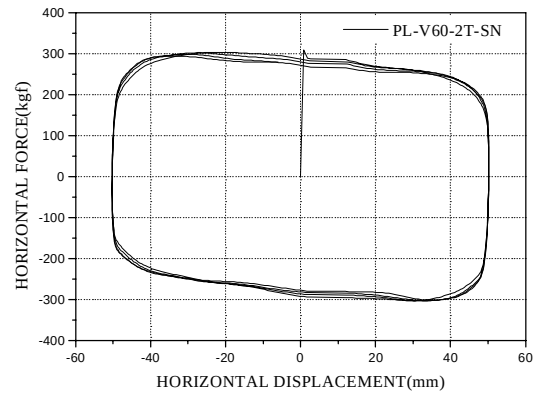


그림 5. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

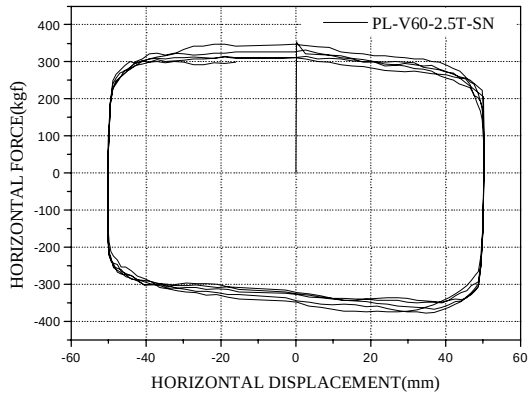


그림 6. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=2500kgf, SIN)

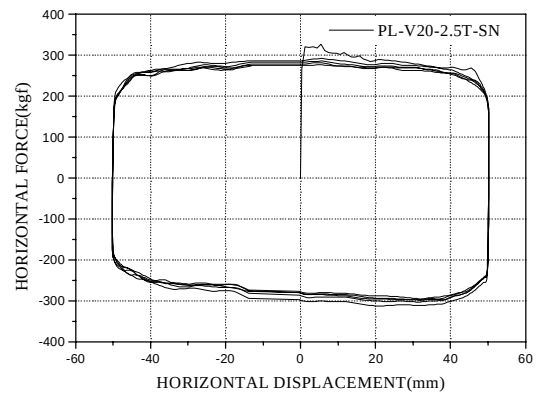


그림 7. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=31.42mm/sec, P=2500kgf, SIN)

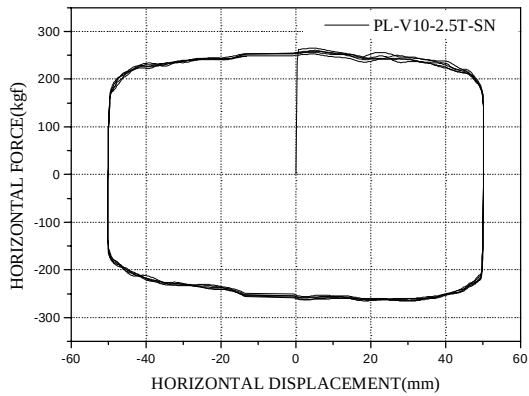


그림 8. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=15.71mm/sec, P=2500kgf, SIN)

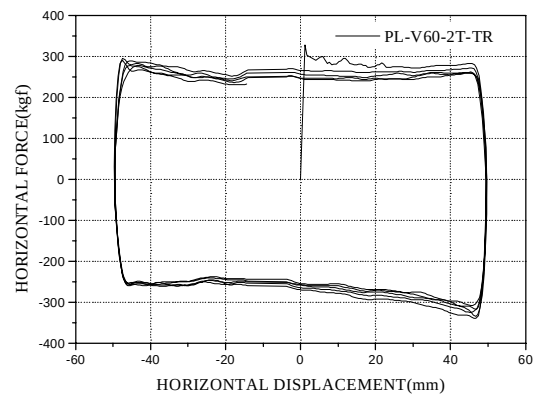


그림 9. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, CV)

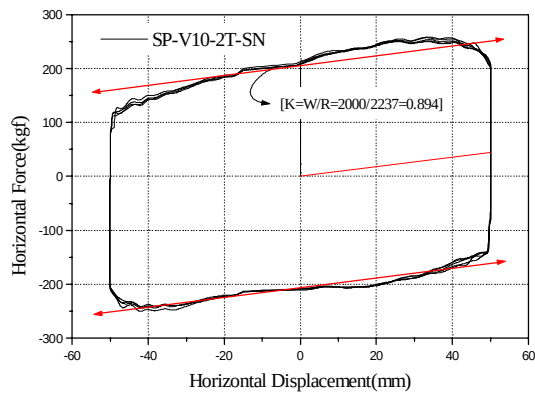


그림 10. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=15.71mm/sec, P=2000kgf, SIN)

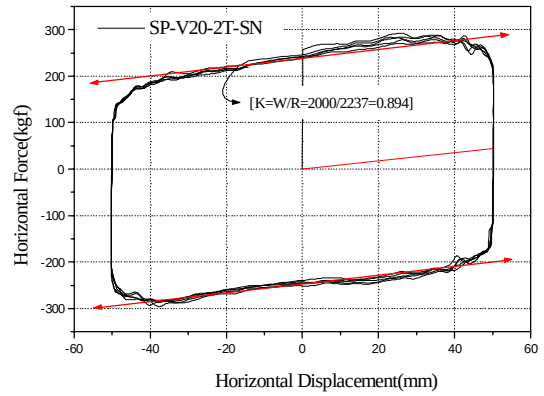


그림 11. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=31.42mm/sec, P=2000kgf, SIN)

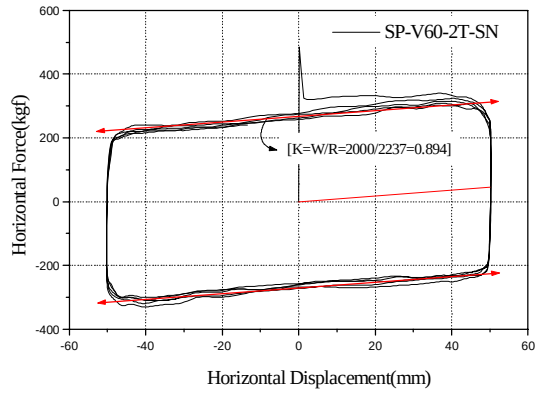


그림 12. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

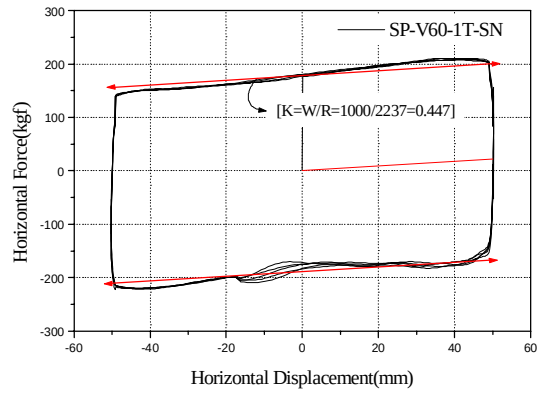


그림 13. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=94.25mm/sec, P=1000kgf, SIN)

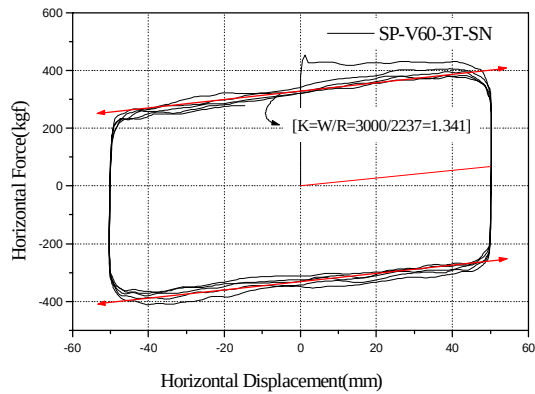


그림 14. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=94.25mm/sec, P=3000kgf, SIN)

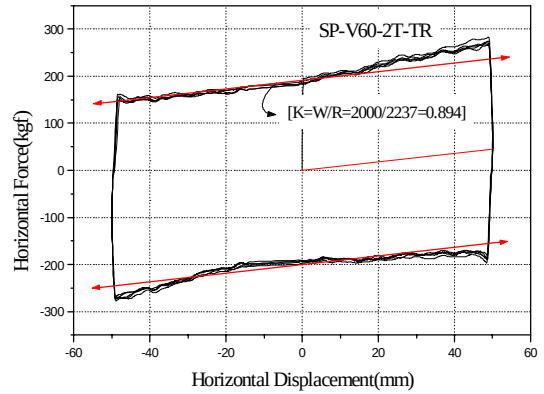


그림 15. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, CV)

식 3에는 Mokha⁽²⁾ 등에 의해 제안된 속도($\dot{U}$)에 따른 마찰계수(μ)식을 나타내었고, 여기서 f_{max} 는 마찰계수가 수렴하는 고속에서의 마찰계수이고, f_{min} 은 속도가 매우 작을 경우의 마찰계수를 의미하며, a 는 곡선의 변화량을 결정하는 상수이다.

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min}) \exp(-a |\dot{U}|) \quad (\text{식 3})$$

평면판 시험결과 측정된 가력속도의 변화에 따른 마찰계수를 Mokha 등에 의해서 제안된 마찰계수식과 함께 비교하여 그림 16에 나타내었다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 최대가력속도가 3.14mm/sec에서 314.16mm/sec 까지 증가할 때 마찰계수는 수직하중(압력)에 따라 최소 0.05에서 최대 0.17까지 저속에서는 급격히 증가하다가 고속구간에서는 일정값에 수렴함을 볼 수 있었고, Mokha 등에 의해서 제안된 마찰계수 추정식과도 잘 일치함을 볼 수 있었다.

그림 6~그림 8에는 속도의 변화에 따른 평면판 시험체의 이력거동을 표현하기 위하여 수직하중이 2500kgf 인 경우에 대하여 최고 가력속도가 각각 15.71, 31.42, 94.25mm/sec 인 시험체에 대하여 마찰력-수평변위 관계를 나타내었다. 그림 6~그림 8에서 또한 가력속도가 증가함에 따라 동일한 수직하중이 가해질 때 마찰력이 증가함을 볼 수 있다. 또한 이력곡선에서 초기 마찰계수(정적마찰계수)는 동적 마찰계수 보다 상당히 높게 측정됨을 볼 수 있는데, 본 실험에서는 이 값이 관심의 대상은 아니었으므로 각 시험체마다 동일하게 마찰면 상태를 유지해주지 않아 정적마찰계수에 대한 일정한 경향을 발견하기는 어려웠다.

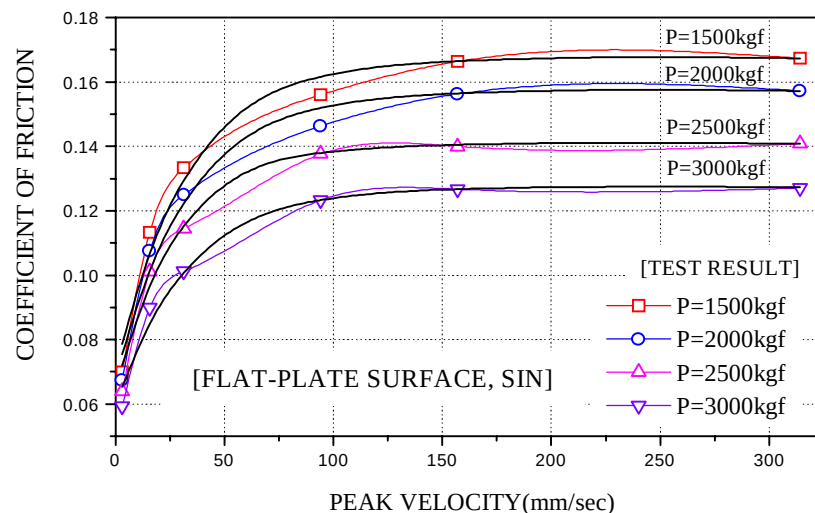


그림 16. Maximum Coefficient of friction with variation of peak velocity
(Flat-Plate Surface, Sine wave, Amplitude=50mm)

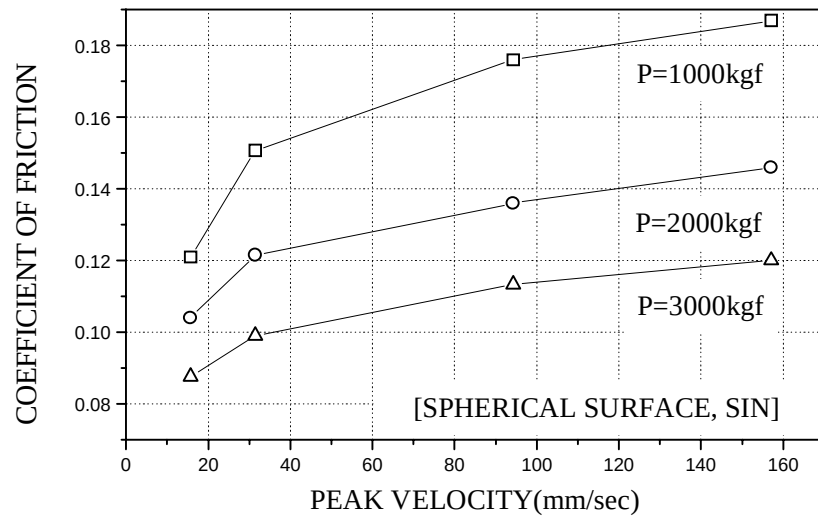


그림 17. Maximum Coefficient of friction with variation of peak velocity
(Spherical Surface, Sine wave, Amplitude=50mm)

구면의 마찰면을 갖는 실제 마찰진자 베어링의 마찰 시험결과 측정된 가력속도의 변화에 따른 마찰계수를 그림 17에 나타내었다. 가력속도의 범위가 넓지 않아 저속과 고속에서의 마찰계수 값은 파악하지 못했지만, 평면판 시험에서와 같이 최대가력속도가 증가함에 따라 마찰계수는 일정값까지 증가함을 알 수 있었다.

그림 10~그림 12에는 속도의 변화에 따른 구면판 시험체의 이력거동을 표현하기 위하여 최고 가력속도가 각각 15.71, 31.42, 94.25mm/sec인 시험체에 대하여 마찰력-수평변위 관계를 나타내었다. 그림 10~그림 12에서도 역시 동일한 수직하중이 가해질 때 가력속도가 증가함에 따라 마찰력이 증가함을 볼 수 있다. 또한 마찰면의 곡률과 수직하중에 의해 발생한 복원강성(이력곡선의 기울기) 값은 식 1에 의해 계산된 값과 잘 일치함을 볼 수 있다. ($K = W/R$)

4.2 수직하중(압력)에 따른 마찰특성 비교

상부에 가해지는 수직하중(압력)이 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 수직하중을 1500, 2000, 2500, 3000kgf로 변화시켜가며 평면판 마찰특성실험을 수행하였다(수직 압력 : 119.37, 159.16, 198.95, 238.74kg/cm²). 이때 마찰재의 직경은 40mm로 지압면적은 12.566cm²가 되며, 선행 연구자들의 연구에서 시험체 크기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 입증되었으므로 크기에 따른 영향은 고려하지 않았다. 그림 18에는 평면판 시험결과 측정된 수직하중(압력)의 크기에 따른 마찰계수를 나타내었다. 그림 18에서 각각의 가력속도에 대하여 수직하중이 증가할수록 마찰계수는 감소함을 볼 수 있고 이러한 감소비율

은 최대가력속도가 클수록 더 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 4~그림 6에는 수직하중의 변화에 따른 대표적인 시험체의 마찰력-수평변위 이력곡선을 비교하여 나타내었다.

본 실험에서 측정된 평면판 시험체의 마찰계수 값은 Mokha⁽²⁾ 등에 의한 실험값에 비해 다소 크게 산정되었는데, 이는 마찰진자 베어링 하부에 설치된 슬라이딩 베어링에 마찰력이 작용하였기 때문으로 파악된다. 따라서 정량적인 값 자체는 하부 슬라이딩 베어링의 마찰력을 감안한 보정절차가 필요할 것으로 사료되지만, 각 변수에 따른 영향을 파악하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다.

구면판 시험체에 대한 마찰 시험결과 측정된 수직하중의 변화에 따른 마찰계수를 그림 19에 나타내었고, 그림 12~그림 14에는 수직하중의 변화에 따른 구면판 시험체의 마찰력-수평변위 관계를 나타내었다. 그림 19에서 볼 수 있듯이 마찰계수는 평면판 시험체에서와 같이 수직하중이 증가함에 따라 감소하였고 이러한 감소비율은 최대가력속도가 클수록 더 높게 나타남을 알 수 있다.

4.3 수평변위(진폭) 크기에 따른 동특성 비교

수평 변위의 크기가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 진폭을 ± 10 , ± 20 , ± 30 , ± 40 , ± 50 mm로 변화시켜가며 평면판, 구면판 마찰특성실험을 수행하였다. 이때 최대가력속도는 94.25mm/sec, 수직하중은 2000kgf로 모든 시험체에 동일하게 적용하였으며, 마찰재는 순수 PTFE(unfilled PTFE) 재질을 사용하였고, 시험방법은 일정수직하중을 가력한 상태에서 수평변위를 사인파의 형태로 제어하는 방법을 따랐다.

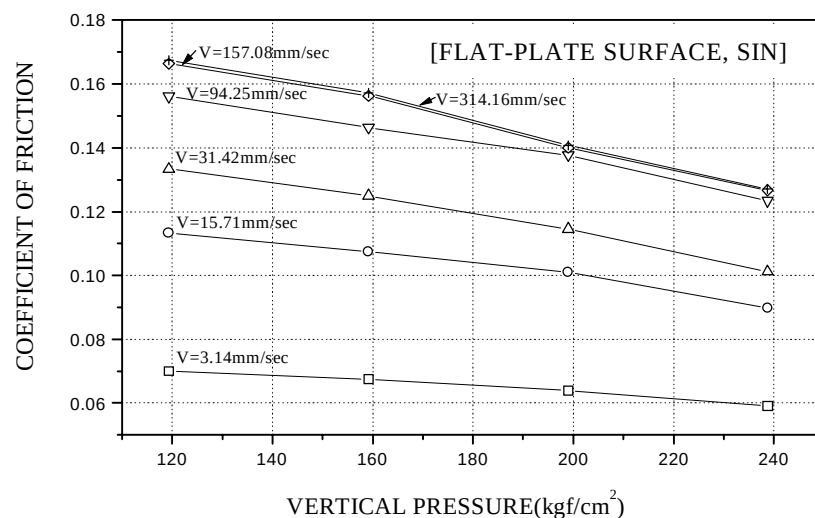


그림 18. Maximum Coefficient of friction with variation of vertical pressure
(Flat-Plate Surface, Sine wave, Amplitude=50mm)

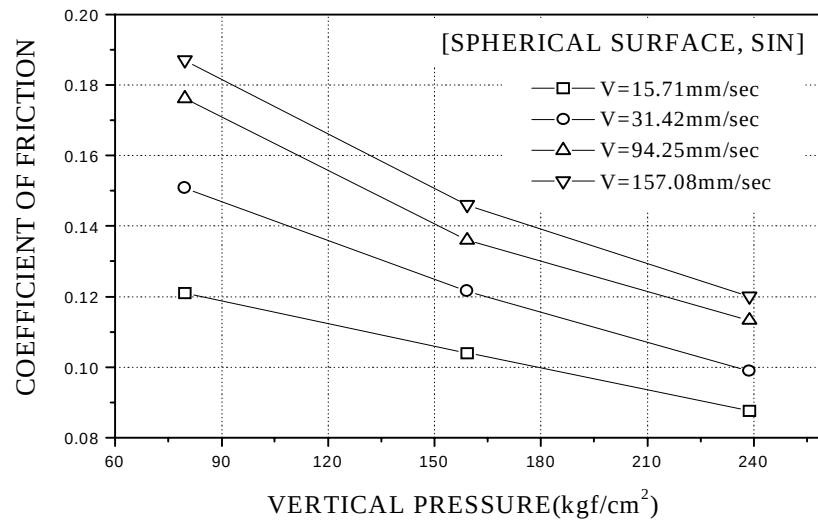


그림 19. Maximum Coefficient of friction with variation of vertical pressure
(Spherical Surface, Sine wave, Amplitude=50mm)

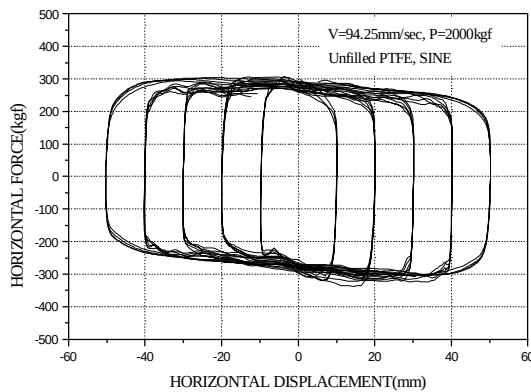


그림 20. Frictional Force-Displacement Loops
(Flat-SF, V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

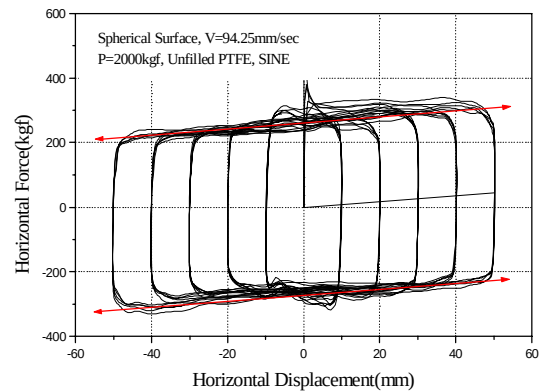


그림 21. Frictional Force-Displacement Loops
(Spherical-SF, V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

시험결과 측정된 각 시험체의 마찰력-수평변위 이력곡선을 그림 20, 21에 중첩하여 나타내었다. 그림 20, 21에서 볼 수 있듯이 시험체의 마찰특성은 수평변위(진폭)에 관계없이 일정한 마찰력을 나타내고 이력곡선은 동일한 경로를 따름을 알 수 있었다.

여기서 평면판 마찰시험의 경우 이력곡선의 기울기는 존재하지 않아야 하지만, 가력장치의 문제로 곡선의 기울기가 약간 발생한 것으로 파악되며, 구면판 시험체의 경우는 구면의 곡률과 재하된 수직하중에 의해 계산된 복원강성 값과 거의 일치함을 볼 수 있다.

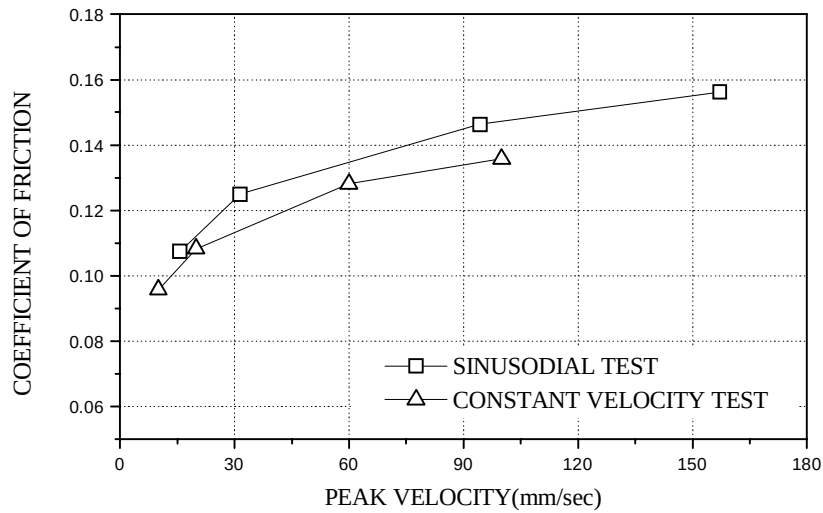


그림 22. Maximum Coefficient of friction with variation of Test type
(Flat-Plate Surface, Sine wave, Amplitude=50mm, P=2000kgf)

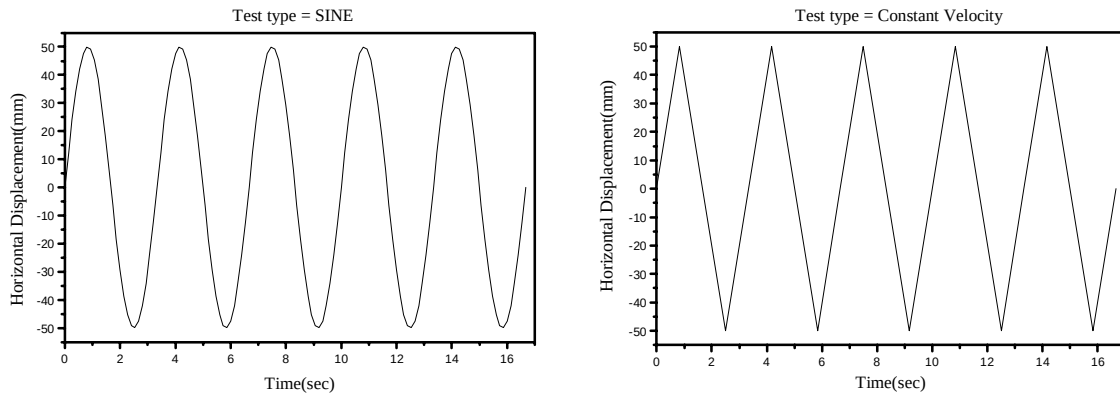


그림 23. Displacement-Time Curve(Left : Sinusoidal, Right : Constant velocity)

4.4 입력파의 형태에 따른 동특성 비교

수평 가력기에 의해 제어되는 수평 변위입력의 형태가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 입력파형을 사인파와 삼각파형으로 하여 평면판 마찰특성실험을 수행하였다. 이때 최대가력속도는 사인파의 경우 15.71, 31.42, 94.25, 157.08mm/sec로 설정하였고, 삼각파형의 경우엔 10, 20, 60, 100mm/sec로 설정하여 시험하였다. 수직하중은 2000kgf로 모든 시험체에 동일하게 적용하였으며, 마찰재는 순수 PTFE(unfilled PTFE) 재질을 사용하였고, 시험방법은 일정수직하중을 가력한 상태에서 수평변위를 사인파와 삼각파의 형태로 제어하는 방법을 따랐다.

그림 23에는 대표적인 시험체의 사인파 및 삼각파형 변위 제어곡선을 나타내었고, 그림 22에는 시험결과 측정된 입력파의 형태에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 그림 22에서 볼 수 있듯이(동일한 최고 가력속도를 사용하지는 않았지만) 추이곡선으로부터 삼각파형으로 시험한 경우에 마찰계수가 다소 작게 측정되긴 하였으나, 그 차이가 크진 않아 입력파의 형태가 마찰특성에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.

그림 5, 9와 그림12, 15에는 입력파의 형태에 따른 평면판과 구면판 시험체의 마찰력-변위 곡선을 비교하여 나타내었다. 그림 12, 15에서 마찰력-수평변위 이력곡선은 삼각파로 제어한 경우에 비해 사인파로 제어한 경우에 마찰력의 크기가 보다 균일한 것을 볼 수 있다. 이는 수평변위가 증가하면 압축압력의 증가에 따른 마찰력의 증가 경향과 정현파의 경우 영점에서 최고 속도가 되므로 변위 증가에 따른 속도, 마찰계수의 감소 경향이 서로 상쇄효과를 가져오기 때문인 것으로 사료된다. 또한 변위제어의 경우 구면의 곡률에 의해 영점에서 변위가 증가함에 따라 마찰면의 속도는 다소 증가하게 되지만, 본 시험의 경우 마찰면 곡률반경이 매우 크므로 이에 의한 영향은 미소할 것으로 판단된다.

4.5 반복횟수에 따른 동특성 비교

수평력의 반복횟수가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반복횟수를 5, 10, 50, 100cycle로 변화시켜가며 평면판 마찰특성실험을 수행하였다. 이때 최대가력속도는 94.25mm/sec, 수직하중은 2000kgf로 모든 시험체에 동일하게 적용하였으며, 마찰재는 순수 PTFE(unfilled PTFE) 재질을 사용하였다. 시험결과 측정된 10cycle, 50cycle의 경우에 대한 마찰력-수평변위 곡선을 그림 24~그림 25에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 하중가력 사이클이 증가할수록 마찰력이 작게 나타남을 알 수 있었고, 시험후 PTFE 마찰재의 마모정도를 측정한 결과 50cycle 시험후 0.05mm, 100cycle 시험후 0.15mm 정도가 마모된 것을 알 수 있었다.

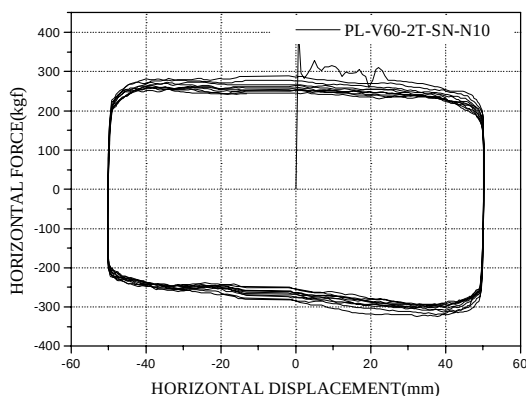


그림 24. Frictional Force-Displacement Loops

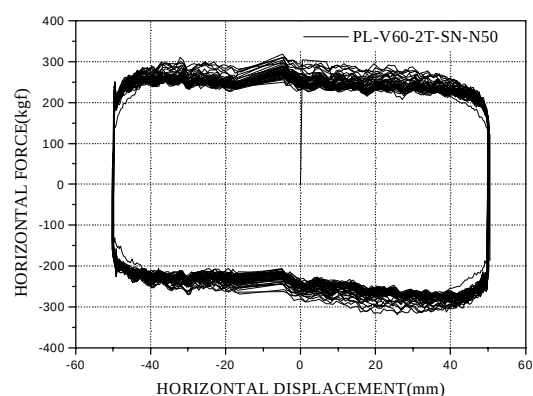


그림 25. Frictional Force-Displacement Loops

(Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN, N=10) (Flat-SF., V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN, N=50)

5. 결론

이상의 수평 가력속도, 수직압력, 입력파형, 수평변위 등에 따른 평면판, 구면판 마찰진자 베어링의 기계적 특성 평가 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평면판 시험체의 가력속도에 따른 마찰 특성은 최대가력속도가 3.14mm/sec에서 314.16mm/sec 까지 증가할 때 마찰계수는 수직하중(압력)에 따라 최소 0.05에서 최대 0.17까지 저속에서는 급격히 증가하다가 고속구간에서는 일정값에 수렴하였다. 또한 이러한 경향은 구면의 마찰진자 베어링에서도 동일한 결과를 나타내었다.
- 2) 평면판, 구면판 시험체의 수직하중(압력)이 마찰특성에 미치는 영향은 각각의 최대 가력속도에 대하여 수직하중이 증가할수록 마찰계수는 감소함을 볼 수 있었고, 이러한 감소비율은 최대가력속도가 클수록 더 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 평면판, 구면판 시험체의 수평변위(진폭) 크기에 따른 마찰 특성은 수평변위에 관계 없이 일정한 마찰력을 나타내고 이력곡선은 동일한 경로를 나타내었다.
- 4) 삼각파형으로 시험한 경우에 사인파의 경우보다 마찰계수가 다소 작게 측정되었지만, 입력파의 형태가 마찰계수에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 “구조물 건진성 평가기술 개발” 과제의 일환으로서 수행되었고 과학기술부의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Zayas V., Low, S.S. and Mahin, S.A., "The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., June, 1987.
2. Mokha, A., Constantinou, M.C. and Reinhorn A.M., "Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of a Sliding Isolation System with a Spherical Surface," Report No.NCEER-90-0020, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York, Buffalo, NY., 1990.
3. 김영중, 허영철, 김병현, “마찰진자형 면진베어링의 특성연구”, 한국지진공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp.407-414, 2000.
4. Park, Y. J., Wen, Y. K. and Ang. A. H. S., "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bidirectional Ground Motions," Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol.14(4), pp.543-557, 1986.