

마찰진자 베어링의 동적 특성평가

Dynamic Property Evaluation of Friction Pendulum Isolation Bearing

이 경 진* 김 갑 순** 서 용 표***
Lee, Kyung-Jin Kim, Kap-Sun Suh, Yong-Pyo

ABSTRACT

The main concept of base isolation system is to reduce the member forces by decreasing the earthquake forces transmitted to superstructure instead of the conventional techniques of strengthening the structural members.

There are two important advantages in friction pendulum systems. The functions of carrying the vertical load and of providing horizontal stiffness are effectively separated. This results in a more stable system that eliminates the need of a fail-safe mechanism. Friction pendulum systems are less sensitive to variations in the frequency content of ground excitation and tend to limit the intensity of the force imparted to the superstructure.

This study investigates the friction coefficients on the FPS test specimens according to the velocity, bearing pressure and test waveform.

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.

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

** 한국전력공사 전력연구원 연구원, 정회원

*** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 정회원

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

본 연구에서는 마찰진자 베어링의 동적특성을 평가하기 위해 마찰진자 베어링을 제작하였다. 제작한 장치는 마찰면의 조도를 일정하게 하고 수직하중과 수평속도, 시험과형을 변화시키면서 시험을 수행하여 시간-이력곡선, 마찰계수의 차이를 분석하였다.

2. 마찰진자 베어링의 원리 및 특성

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

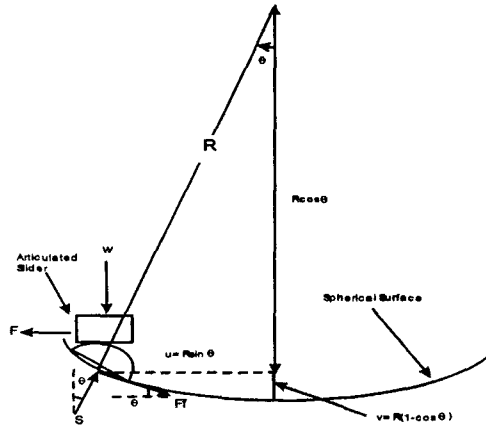


그림 1. 마찰진자 베어링의 기본원리

마찰진자 베어링은 곡면에서 수평방향으로 거동하고 동시에 에너지 흡수능력을 가짐으로써 면진효과를 나타내는 장치이다. 그림 1은 마찰진자 베어링의 기본원리를 나타낸 것으로, 마찰진자 베어링 상부의 구조물은 반지름 R인 진자처럼 거동하게 된다(여기서, R은 구형 곡면의 곡률반지름). 마찰진자 베어링을 설계할 때, 수평방향 변위 u는 0.2R 이하로 설계되고 따라서, 각도 θ 는 작아지게 된다. 이 경우 수평변위 u에서 수평방향력 F는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, W : 상부 구조물로 인한 수직재하하중, μ : 곡면 마찰계수, \dot{u} : 곡면에서의 속도 마찰진자 베어링이 설치된 구조물의 고유진동수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

식 2로 부터 마찰진자 베어링의 고유진동수는 상부구조물의 질량과는 관련이 없고, 면진장치의 기하학적 형상(곡률 반지름)과 관련이 있음을 알 수 있다. 식 1로부터 마찰진자 베어링의 수평방향력은 수직재하하중과 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 대

변형시 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. 동적특성 평가시험

3.1 시험개요 및 시험체 제원

제작한 마찰진자 베어링은 마찰면 조도가 $0.3 \mu\text{m}$ 이고, 설계압축하중은 2 tonf, 곡률반경은 2.236m이다. 곡면의 마찰재 성분은 순수 PTFE(Unfilled PTFE)이고, 마찰재 반경은 40mm, 지압면적은 12.566cm^2 이고 그림 2는 제작한 마찰진자 베어링과 도면을 나타낸 것이다.

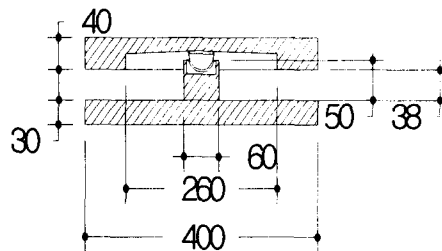


그림 2. 마찰진자 베어링

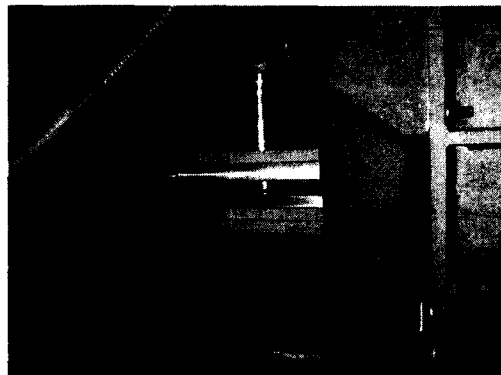
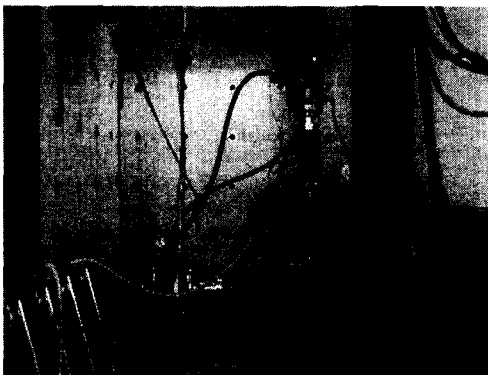


그림 3. 성능시험장치 및 시험전경

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 철골 구조물로 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, 먼진장치 하부에 철골 Jig Plate를 부착하였다. 하부 철골 Jig Plate에 수평 방향 유압가력기를 부착하여 변형을 제어하고, Jig Plate 하부에는 슬라이딩 베어링(Sliding Bearing)을 설치하여 수평방향 가력시 마찰력을 최소화시켰다.

시험방법은 먼진장치 마찰면의 속도에 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 등으로 변화시켜 시험을 수행하였다. 상부재하하중은 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 tonf로 변화시키고, 입력파형은 삼각파와 사인파를 적용하여 반복횟수를 5, 10, 50, 100 회 수행하여 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 및 분석

마찰진자 베어링의 동적특성을 결정짓는 가장 중요한 부분은 마찰면의 마찰계수 평가로 생각할 수 있다. 따라서 Teflon 표면의 마찰특성에 미치는 영향변수를 살펴보기 위하여 평면판 마찰시험 결과 측정된 시험체의 횡하중(마찰력)-변위곡선을 그림 4~그림9에 나타내었다.

4.1 가력속도에 따른 동특성 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)

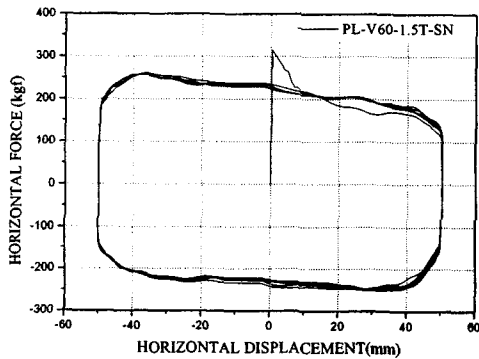


그림 4. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=1500kgf, SIN)

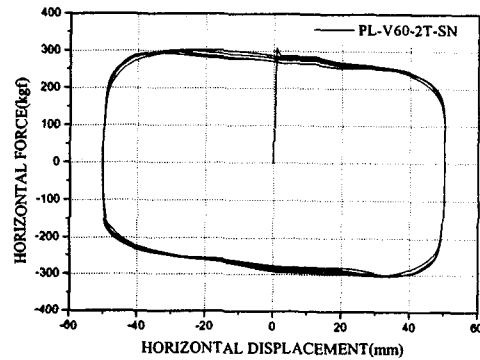


그림 5. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

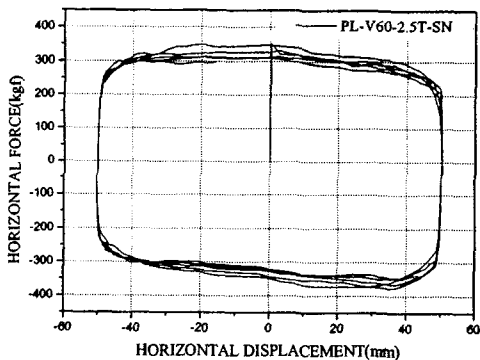


그림 6. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=2500kgf, SIN)

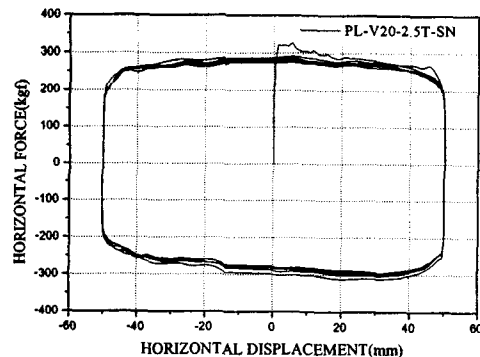


그림 7. Frictional Force-Displacement Loops (V=31.42mm/sec, P=2500kgf, SIN)

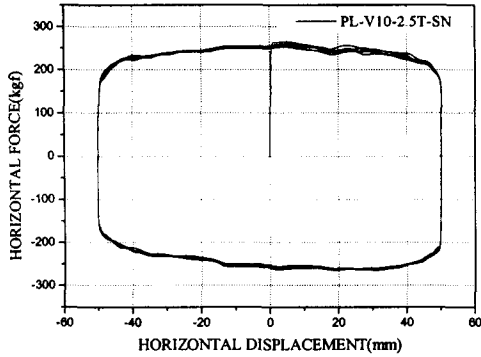


그림 8. Frictional Force-Displacement Loops
(V=15.71mm/sec, P=2500kgf, SIN)

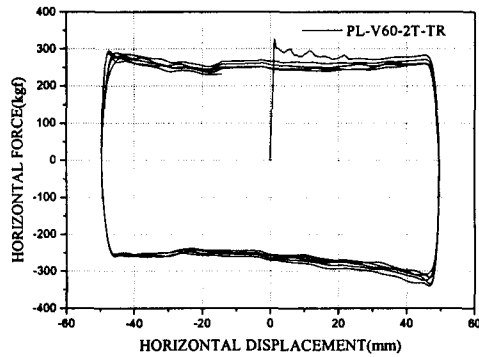


그림 9. Frictional Force-Displacement Loops
(V=94.25mm/sec, P=2000kgf, CV)

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.

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.

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

시험결과 측정된 가력속도의 변화에 따른 마찰계수를 Mokha 등에 의해서 제안된 마찰계수식과 함께 비교하여 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 볼수 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 볼수 있었다.

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

4.2 수직하중(압력)에 따른 동특성 비교

상부에 가해지는 수직하중(압력)이 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 수직하중을 1500, 2000, 2500, 3000kgf로 변화시켜가며 평면판 마찰특성실험을 수행하였다(수직압력 : 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.

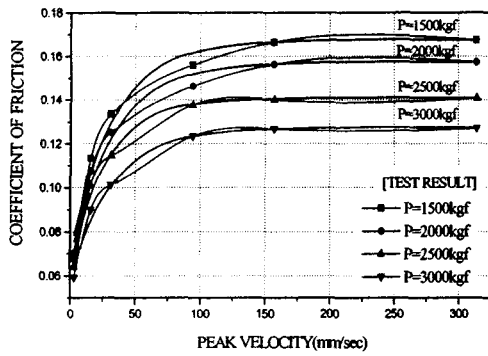


그림 10. Maximum Coefficient of friction with variation of peak velocity

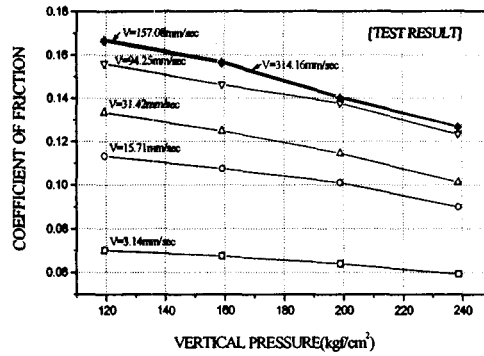


그림 11. Maximum Coefficient of friction with variation of vertical pressure

그림 11에는 시험결과 측정된 수직하중(압력)의 크기에 따른 마찰계수를 나타내었다. 그림 11에서 각각의 최대가력속도에 대하여 수직하중이 증가할수록 마찰계수는 감소함을 볼 수있고 이러한 감소비율은 최대가력속도가 클수록 더 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 4~그림 6에는 수직하중의 변화에 따른 대표적인 시험체의 마찰력-수평변위 이력곡선을 비교하여 나타내었다.

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 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.

시험결과 측정된 각 시험체의 마찰력-수평변위 이력곡선을 그림 12에 중첩하여 나타내었다. 그림 12에서 볼수 있듯이 시험체의 마찰특성은 수평변위(진폭)에 관계없이 일정한 마찰력을 나타내고 이력곡선은 동일한 경로를 따름을 알 수 있었다.

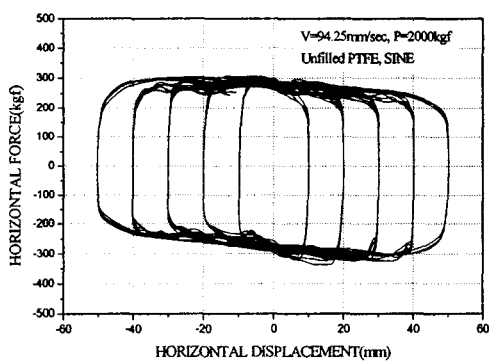


그림 12. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN)

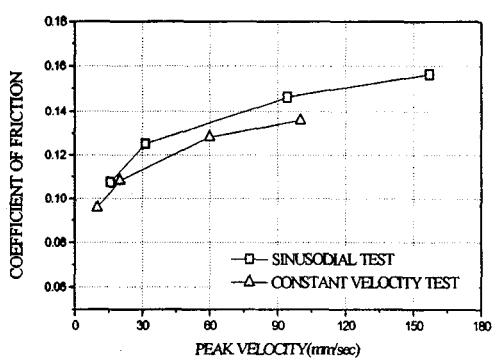


그림 13. Maximum Coefficient of friction with variation of Test type

4.4 입력파의 형태에 따른 동특성 비교

수평 가력기에 의해 제어되는 수평 변위입력의 형태가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 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 14에는 대표적인 시험체의 사인파 및 삼각파형 변위 제어곡선을 나타내었고, 그림 13에는 시험결과 측정된 입력파의 형태에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 그림 13에서 볼수 있듯이 동일한 최고 가력속도를 사용하지 않았으나 추이곡선으로부터 삼각파형으로 시험한 경우에 마찰계수가 다소 작게 측정되긴 하였으나 그 차이가 크진 않아 입력파의 형태가 마찰특성에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다. 그림 5, 그림9에는 입력파의 형태에 따른 마찰력-변위 곡선을 비교하여 나타내었다.

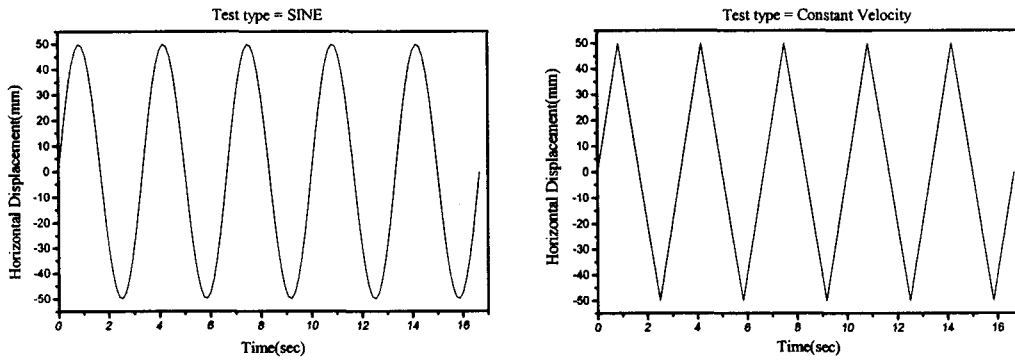


그림 14. Displacement-Time Curve(Left : Sinusoidal, Right : Constant velocity)

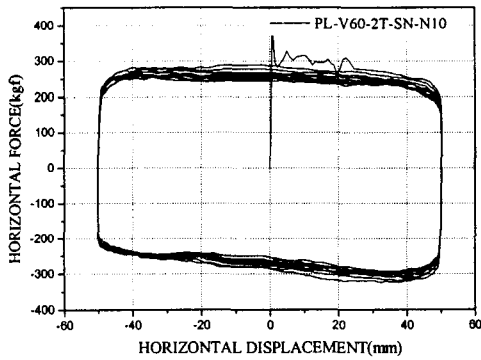


그림 15. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN, N=10cycle)

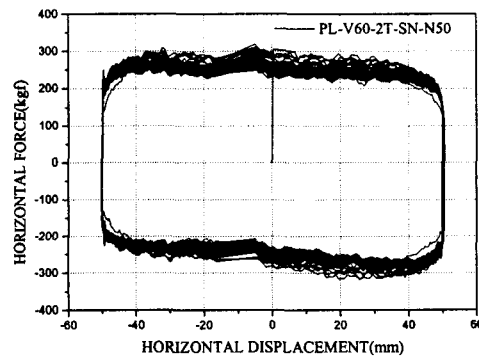


그림 16. Frictional Force-Displacement Loops (V=94.25mm/sec, P=2000kgf, SIN, N=50cycle)

4.5 반복횟수에 따른 동특성 비교

수평력의 반복횟수가 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반복횟수를 5, 10, 50, 100cycle

로 변화시켜가며 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 15~그림 16에 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.

5. 결론

본 연구를 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 가력속도에 따른 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 가력속도가 증가함에 따라 동일한 수직하중이 가해질 때 마찰력이 증가하였다.
- 2) 수직하중(압력)이 마찰특성에 미치는 영향은 각각의 최대가력속도에 대하여 수직하중이 증가할수록 마찰계수는 감소함을 볼 수있고 이러한 감소비율은 최대가력속도가 클수록 더 높게 나타남을 알 수 있다.
- 3) 수평변위(진폭) 크기에 따른 특성은 수평변위에 관계없이 일정한 마찰력을 나타내고 이력곡선은 동일한 경로를 나타내었다.
- 4) 삼각파형으로 시험한 경우에 사인파보다 마찰계수가 다소 작게 측정되었지만, 입력파의 형태가 마찰계수에 미치는 영향은 미소함을 알 수 있었다.

본 연구는 과학기술부의 지원하에 “구조물 건전성 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 추계 학술대회 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.