

마찰진자형 Isolator의 특성 및 구조물 적용 실험연구

An Experimental Study on Characteristics of Friction Pendulum Isolation Bearings and Its Application to a Structure

김영중*
Kim, Young-Joong

허영철*
Huh, Young-Cheol

김병현**
Kim, Byung-Hyun

ABSTRACT

The friction pendulum type seismic isolation system (FPS) using the PTFE based materials has been developed to provide a simple and effective way to achieve earthquake resistance for buildings. PTFE materials are soft and apt to be deformed easily after a few working cycles. Instead of the usual PTFE materials, the Polyimide material was used in this research. Polyimide is harder than PTFE, but has smaller friction coefficient and longer duration for usage. In this paper, various kinds of PTFE materials were tested to define the frictional characteristics compared with the Polyimide material. FPS was manufactured with fine surface roughness and used with Polyimide material to show the seismic isolation efficiency, and life duration when applied to a rigid mass model and a 5 story frame model.

1. 서 론

구조물의 수직 하중을 받는 상태에서 수평 방향의 고유진동수를 낮추기 위한 Isolator의 적용은 과도한 수직하중에 비해 수평방향의 강성이 매우 작을 것이 요구된다. 납삽입 베어링의 경우 수평 방향의 변위가 커지면 좌굴의 우려 때문에 수직 하중에 대한 적재 능력이 감소되어 적용 상의 제한 요소가 된다.

그러나 마찰진자 베어링(Friction Pendulum Bearing System, FPS)은 마찰판의 곡률에 따른 진자 운동을 하기 때문에 고유진동수의 변화, 즉 수평 강성의 변화가 없고, 마찰판의 운동 반경 내에서는 항상 수직하중에 대한 적재 능력이 일정하므로 매우 효과적인 isolator로서 인정되고 있다.

마찰진자 베어링의 마찰재로서는 Teflon 계열의 합성수지로서 마찰계수가 작고 내열성 및 내식성, 내화화학성이 우수한 PTFE(Polytetrafluoroethylene)를 기본 소재로 탄소, 유리섬유, 구리 등 여러 성분을 혼합한 복합 재료가 개발되어 응용되고 있다. PTFE를 면진장치에 응용한 연구는 1980년대 초에 시작하여 평면판의 사이에 PTFE를 삽입하여 수직하중을 지지하도록 하고 다른 복원장치 및 감쇠장치를 도입한 것으로서 국내에서도 교량받침으로 제작되어 적용되고 있으며, AASHTO를 비롯한 규격이 제정되어 활용되고 있다[1]. Mokha 등[2]은 광범위한 연구를 통하여 PTFE와 마찰재의 변화에 따른 특성을 연구하였고, 미국의 Buffalo 소재 뉴욕주립대학(SUNY)의 MCEER을 중심으로 마찰진자 베어링을 응용한 활발한 연구가 진행되고 있으며[1,3], San Diego 대학에서는 직경 2 m

* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원, 정희원

** 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 책임연구원, 정희원

수준의 초대형 시험기를 운영하며 실제 적용을 위한 연구가 이루어지고 있다.

국내에서는 한국기계연구원을 중심으로 마찰진자의 특성 및 이를 강제 모형에 적용한 결과를 발표한 바 있다[4,5]. 그러나 마찰재로서 PTFE를 사용하는 경우 적절한 마찰력을 얻기 위해 마찰재의 수직응력 한도 내에서 응력을 변화시켜 본 결과 PTFE 재료의 마모가 커서 장시간의 활용이 어려운 점을 알게 되었다. 이에 따라 본 논문에서는 새로운 재료로서 미국 듀폰사에서 최근에 개발된 Polyimide를 마찰재로서 채택, 비교하였다. 우선 800 kg의 수직하중을 받는 상태에서 고유진동수가 0.7 Hz 수준의 마찰진자 베어링을 설계, 제작하고, 강제 질량계에 적용하여 여러 종류의 마찰재에 대한 특성을 시험하여 분석한 후, 5층 프레임형 구조물에 설치, 시험하여 면진 효과를 확인함으로써 면진구조물의 설계에 적용하기 위한 일련의 과정을 소개하고자 한다.

2. 마찰진자 베어링의 특성

2.1 시험편

본 논문에서 이용한 시험편은 마찰면의 곡면을 수치 가공한 후 조도가 평균값(R_a)으로 $0.03 \mu\text{m}$ 가 되도록 Lapping 기계를 이용하여 정밀 가공하였다. 이는 기존의 연구 결과에 비해 매우 작은 값으로서 조도에 따라 마찰력이 변할 수 있는 가능성을 줄이기 위해 시도되었다. 시험편의 특성은 시험 구조물의 중량이 약 3 톤임을 감안하여 설계되었으며, 표1에 주요 설계값을 정리하였다. 마찰재의 성분은 표2와 같이 순수 PTFE(Unfilled PTFE)를 비롯하여, PTFE와 혼합재로서 Glass Fiber, Bronze 및 Carbon Fiber를 사용한 3종 및 Polyimide를 대상으로 하였다. Polyimide는 PTFE 소재에 비하여 강도가 매우 높고, 신율이 작아 변형이 거의 발생하지 않는다. 그림1에서 시험편의 주요 치수와 제작된 형상을 볼 수 있다.

표 1: Design Values of the Friction Pendulum Bearing

Dead Load	800 kg / Unit
Vertical Stress	20 MPa
Diameter of Friction Material	22.3 mm
Surface Roughness	$R_a = 0.03 \mu\text{m}$
Radius of Curvature of Upper Plate	0.5 m
Frequency/Period	0.705 Hz/ 1.42 sec
Restoring Stiffness	16,000 N/m
Total Displacement of Design	400 mm
Plate Material	SC45C Steel
Surface Coating Material/Thickness	Cr / $50 \mu\text{m}$

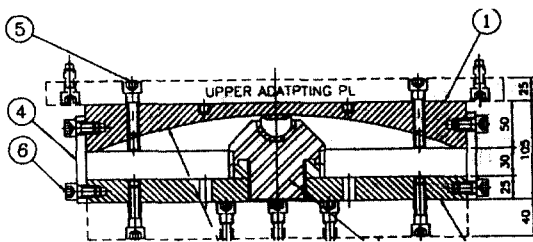


그림 1: Friction Pendulum Bearing System

표 2: Characteristics for Friction Materials

특성 \ 재료	PI	Unfilled PTFE	GM	BR	CF
밀도 (g/cm ³)	1.34	2.17	2.28	3.95	2.09
인장강도 (kgf/cm ²)	1,428	330	178	170	245
신율 (%)	9.0	350	300	220	300
압축탄성률 (kgf/cm ²)	41,000	5,700	8,700	11,300	8,000
열전도율 (kcal/m hr °C)	0.22	0.20	0.28	0.40	0.40
충전재 (%)	Polyimide (100)	PTFE (100)	Glass fiber (15)/MoS ₂ (5)	Bronze (60)	Carbon fiber (10)

2.2 특성 시험



그림2: Setup for Experiments

마찰재의 특성 시험을 위하여 그림2와 같이 강체 질량하부에 isolator를 장착하고 isolator의 하부에는 3축 로드셀을 설치하였다. 동적 상태를 구현하기 위하여 정현파로 진동대를 가진하며, 강체 질량의 상대 변위와 마찰판에 작용하는 하중을 측정하였다.

정현파의 주파수는 1Hz를 사용하였으며, 진폭을 조정함으로써 다양한 속도의 변화를 얻을 수 있었다. 시험 과정에서 PTFE를 이용한 마찰재들은 모두 박리가 발생하거나 변형에 따라 수차례의 시험 후 교체가 필요함에 비해 Polyimide는 전혀 변형이 일어나지 않았다.

2.3 특성 시험 결과

마찰력은 일반적으로 수직하중과 마찰판의 마찰계수의 곱으로써 정의된다. 그러나 PTFE 계열의 마찰재의 경우 마찰계수가 상대속도에 따라, 또 수직하중에 따라 변하는 것으로 알려져 있다.

그림3부터 그림7의 (b)는 각각의 마찰재를 이용하여 구한 평균 수평력과 평균 변위간의 히스테리시스 곡선을 보여주고 있다. 이 경우의 마찰계수는 수평력을 동시에 구해진 수직력으로 나누어 구할 수 있다. 앞의 정현파 시험 방법에 따르면 수직하중의 변화는 크지 않으므로 계속된 변위를 미분한 속도를 이용하여 마찰계수와와의 관계를 그림3부터 그림 7까지의 (a)에 보였다.

이를 보면 속도가 어느 정도 이상에서는 마찰계수가 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 단, 속도가 매우 작아서 거의 정지해 있는 구간에서는 이와는 다른 특성을 보이고 있다. 즉 마찰재의 수평 탄성 및 Articulator 지지부의 탄성 특성에 따라 속도에 비례하는 구간이 존재하며, 이 구간을 벗어나 속도가 증가하면서 overshoot 현상도 발생한다. 이 마찰계수를 수식으로 표현하면 다음과 같으며, 시험데이터로부터 표3의 값을 도출하였다.

$$\mu = \begin{cases} (f_0/v_0)|v|, & |v| \leq v_0 \\ f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min})e^{-a|v|}, & |v| > v_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 μ 는 마찰계수, f_{\max} 와 f_{\min} 은 각각 최대, 최소마찰력, v 는 속도를 의미하며, v_0 는 마찰계수의 특성이 바뀌는 속도 구간을 의미한다.

표 3: Characteristic Values of Friction Materials

Material	f_0	v_0 (mm/s)	f_{max}	f_{min}	a (s/mm)
Polyimide	0.1	6	0.102	0.08	0.05
Unfilled	0.1	6	0.143	0.06	0.02
GM	0.1	6	0.180	0.10	0.02
BR	0.1	6	0.190	0.10	0.015
CF	0.12	6	0.185	0.12	0.015

3. 구조물 적용시험

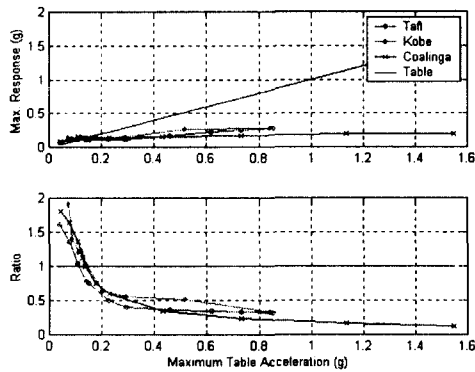


그림 8: Seismic Response and Isolation Ratio of the Rigid Mass Model with FPS

3.1 강체 질량 적용시험

그림 2와 같은 총 중량 약 3.4톤의 강체 질량계에 Polyimide를 이용한 isolator를 적용하여 1자유도계에 대한 면진 특성을 시험하였다.

지진입력 신호로는 단일방향의 Taft, Kobe, Coalinga seismic records를 사용하였으며, 그림 8과 같이 입력 지진의 크기가 약 0.15 g 수준부터 면진 효과가 발생하며 0.3 g 이상부터는 1/2이하의 현저한 효과를 보임을 알 수 있다.

3.2 5층 프레임 구조물 적용시험

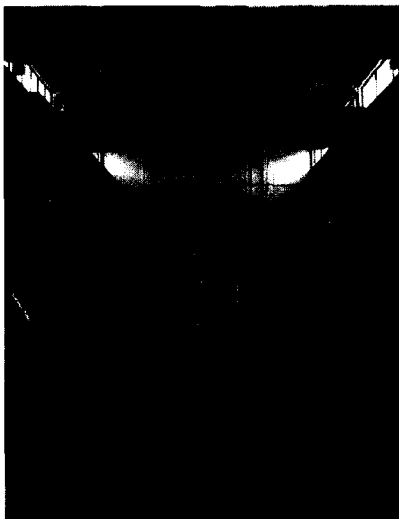
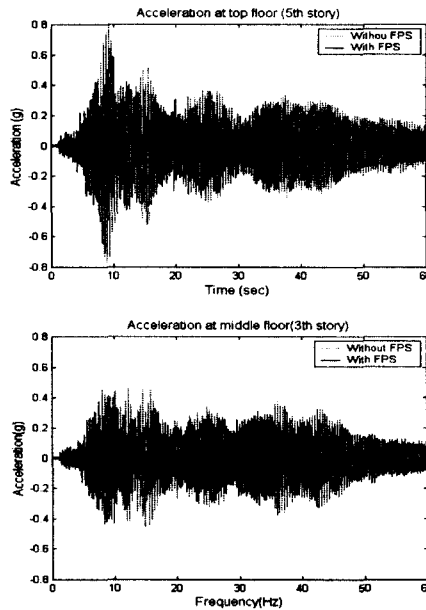


그림 9: 5 Story Frame Model and Seismic Responses at EPGA 0.1g of Taft Earthquake



다자유도계에 대한 마찰진자 isolator의 면진 특성을 파악하기 위하여 그림 9와 같이 총 중량 약 3.4톤의 5층 프레임 구조물에 대한 면진 특성을 시험하였다. 각 층은 $L \times B \times H = 1200\text{mm} \times 800\text{mm} \times 3250\text{mm}$ 의 후판으로 제작되었으며, 층간높이 $h = 600\text{mm}$ 일 때, 고정지지된 경우의 고유진동수는 2.54 Hz, 7.59 Hz, 12.13 Hz, 15.67 Hz, 17.92 Hz로 분석되었다. 지진입력 신호는 단일방향의 Taft seismic records를 적용하였다.

그림 9는 EPGA 0.1g인 Taft seismic record를 적용한 경우 면진 시와 비면진 시의 지진 응답을 비교한 결과이다. 최상층에서 약 1/2정도의 지진응답이 감소하는 면진 효과를 볼 수 있다. 한편 그림 10과 같이 Polyimide 재질에 대한 지진 응답을 SAP2000에 의한 해석 결과와 비교한 결과 마찰계수에 대한 특성값의 타당성을 확인할 수 있다.

그림 11은 마찰계수의 특성값을 이용하여 SAP200을 사용한 지진 응답 해석 결과이다. 마찰재가 Polyimide인 경우가 순수 PTFE인 경우에 비해 응답 변위가 크고, 마찰력이 작게 나타난 점은 마찰계수의 특성에 따라 예측된 결과와 같다.

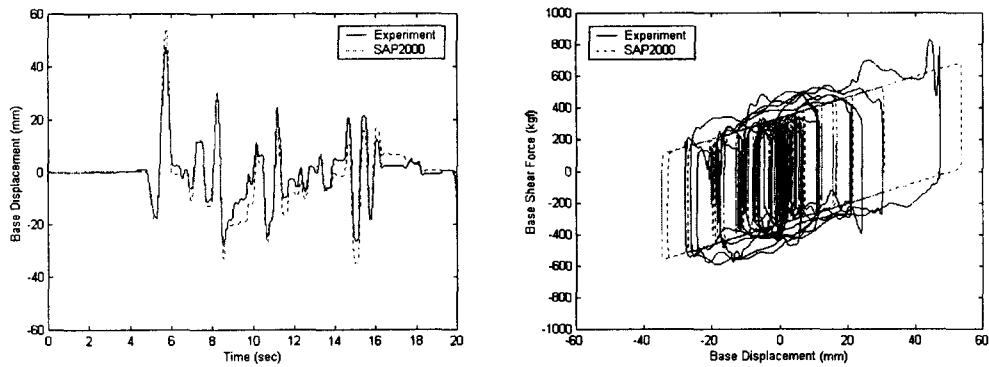


그림 10: Tested Seismic Response and Hysteresis Curve with the Polyimide Material Compared with the Analysis Results at Taft Seismic Record of EPGA 0.4g

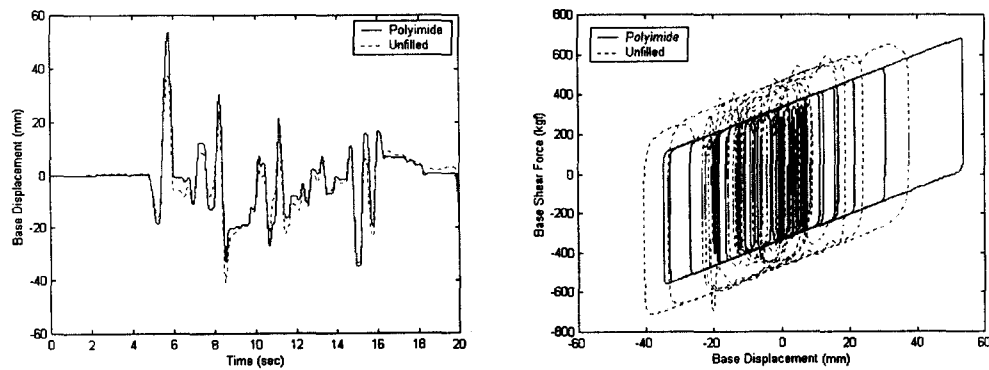


그림 11: Analyzed Seismic Responses and Hysteresis Curves with the Polyimide and Unfilled PTFE Materials at Taft Seismic Record of EPGA 0.4g

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결과를 종합하면 다음과 같다.

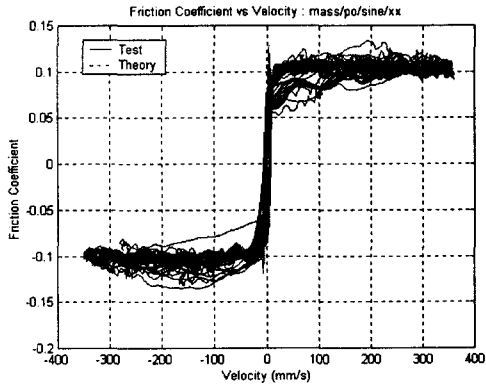
- 1) 마찰재로서 기존에 많이 사용되는 PTFE를 기본으로 한 복합재를 사용할 때 발생하는 마모 및 변형에 따른 마찰력 증가 및 사용 수명의 문제점을 Polyimide 재료를 사용함으로써 해결하였다.
- 2) 마찰계수의 속도에 따른 관계식을 도출하였으며, Polyimide는 거의 일정한 값을 갖는데 비해 PTFE 복합재는 속도가 작을 때는 Polyimide보다 마찰계수가 작지만 속도가 커지면 Polyimide보다 큰 값을 보인다.
- 3) 마찰진자 베어링의 작은 마찰력에 의해 구조물의 면진효과가 매우 우수함을 확인하였다.

후 기

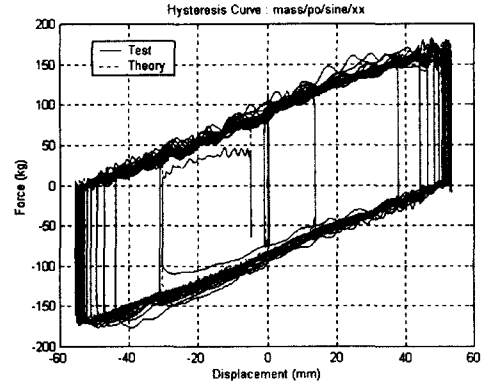
본 연구는 과학기술부의 지원하에 국가지정연구실 사업으로 추진 중인 "제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발"과제의 일환으로서 수행되었다.

참고문헌

1. 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.
2. Mokha, A., Constantinou, M., and Reinhorn, A. (1989), "Teflon Bearings in Base Isolation. I: Test," ACSE, J. of Structural Engineering, 116(2), 438-453.
3. 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.
4. 김영중, 허영철, 김병현, "마찰진자형 면진베어링의 특성 연구", 한국지진공학회 2000추계학술발표회 논문집.
5. 김재관, 이원주, 김영중, 김병현, "마찰진진격리장치와 구조물의 응답제어: 강체질량모델에의 적용", 한국지진공학회 2001춘계학술발표회 논문집.

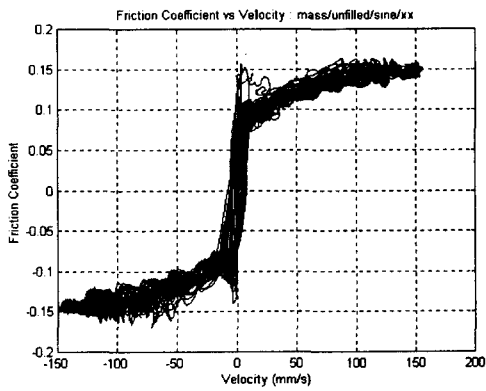


(a) Friction coefficient vs Velocity

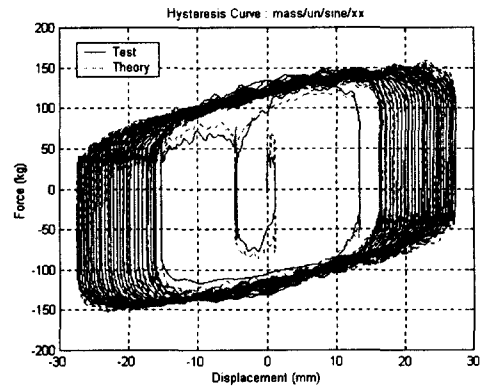


(b) Hysteresis Curve

그림 3: Characteristics of the Polyimide

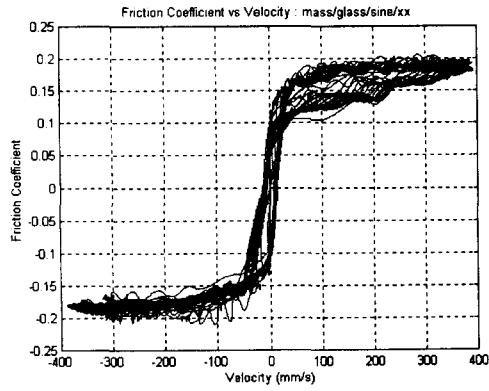


(a) Friction coefficient vs Velocity

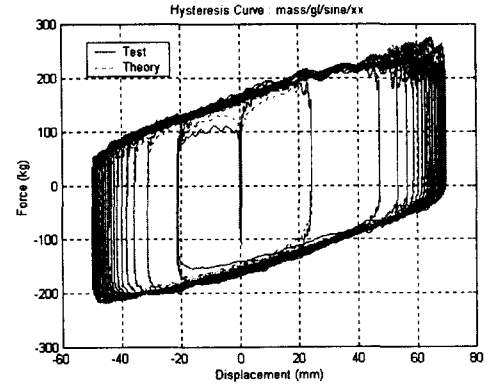


(b) Hysteresis Curve

그림 4: Characteristics of the Unfilled PTFE

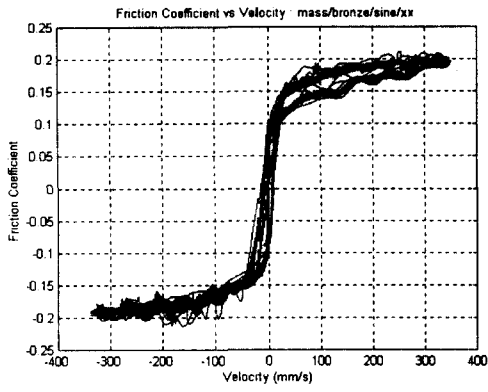


(a) Friction coefficient vs Velocity

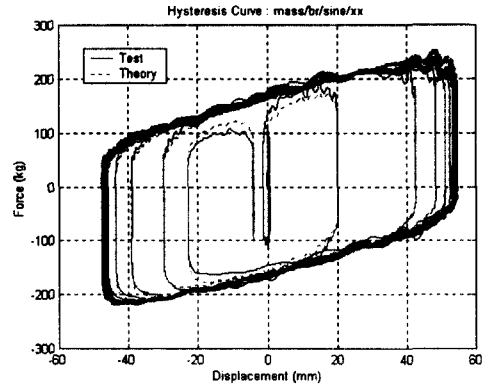


(b) Hysteresis Curve

그림 5: Characteristics of the Glass Filled PTFE

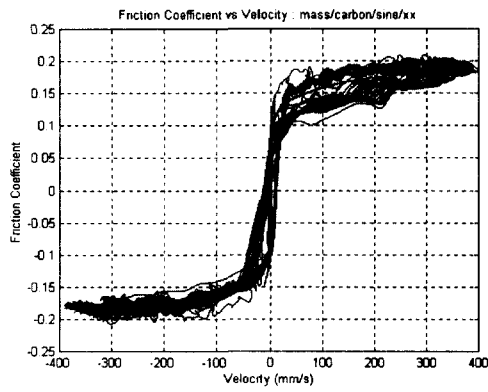


(a) Friction coefficient vs Velocity

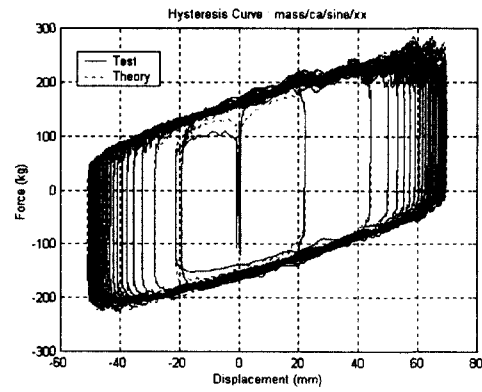


(b) Hysteresis Curve

그림 6: Characteristics of the Bronze Filled PTFE



(a) Friction coefficient vs Velocity



(b) Hysteresis Curve

그림 7: Characteristics of the Carbon Filled PTFE