

진동대실험을 통한 원추형 마찰진자베어링의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Cone-type Friction Pendulum Bearing System Using Shaking Table Test

전 법 규* · 장 성 진* · 김 남 식†

Bub-Gyu Jeon, Sung-Jin Chang and Nam-Sik Kim

(2011년 3월 11일 접수 ; 2011년 6월 22일 심사완료)

Key Words : Friction Pendulum(마찰진자), Seismic Performance(내진성능), Shaking Table Test(진동대실험)

ABSTRACT

FPS(friction pendulum system) is an isolation system which is possible to isolate structures from earthquake by pendulum characteristic. Natural frequencies of the structures could be determined by designing the radius of curvature of FPS. Thus, response vibration could be reduced by changing natural frequency of structures from FPS. But effective periods of recorded seismic wave were various and estimation of earthquake characteristic could be difficult. If effective periods of seismic wave correspond to natural frequency of structures with FPS, resonance can be occurred. Therefore, CFPBS(cone-type friction pendulum bearing system) was developed for controlling the acceleration and displacement of structure by the slope of friction surfaces. Structural natural frequency with CFPBS can be changed according to position of ball on the friction surface which was designed cone-type. Therefore, superstructures on CFPBS could be isolated from earthquake. In this study, seismic performance of CFPBS was evaluated by numerical analysis and shaking table test.

1. 서 론

지진격리장치 중 Zayas 등에 의하여 제안되어진 FPS(friction pendulum system)⁽¹⁾는 마찰판의 곡률 반경과 마찰면의 마찰 등을 설계하여 진자의 특성을 이용해 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있고 이에 따라서 지진동에 의한 응답을 감소시킬 수 있는 장치이다. 하지만 현재까지 기록된 모든 지진의 특성은 다르며 앞으로 발생할 지진의 특성을 예측

하는 것은 난해하다. 그리고 만약 지진의 유효주기가 FPS의 진자특성에 의해 결정되어진 구조물의 고유주기와 일치하면 공진이 발생할 수도 있을 것으로 사료된다. 따라서 전법규 등은 가변적인 고유진동수를 가짐으로 인하여 특정 주파수에 응답특성을 집중시키지 않는 내진장치인 CFPBS(cone-type friction pendulum bearing system)를 개발하고 자유진동실험과 수치적 동적해석을 통하여 그 성능을 검증하였다. CFPBS는 마찰면이 원추형으로 설계되어 볼의 위치에 따라 고유진동수가 변화하며 지진동에 의한 최대가속도응답과 절대변위응답을 조절할 수 있다⁽²⁾.

기계류 및 전기류를 포함한 산업용 구조물은 해당 구조물이 설치될 지역에서 발생가능한 지진에 대하여 안전성을 검증할 필요가 있는데 이를 내진 검증이라고 한다. 내진검증은 크게 시험적인 방법과

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부

E-mail : nskim@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2352, Fax : (051)513-9596

* 부산대학교 사회환경시스템공학과

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

해석적인 방법으로 구분되며 시험적인 방법은 대상 기기를 진동대에 설치하고 실제 지진을 모사하여 기기의 안전성을 검증하는 방법으로 가장 신뢰도가 높은 방법이다⁽³⁾.

이 논문에서는 CFPBS의 이론적 모델을 정립하고 이론식과 설계식을 제안하였으며 이를 바탕으로 수치적 동적해석과 실시간 진동대실험을 통하여 CFPBS의 내진성능을 평가함과 동시에 설계식의 타당성을 검증하였다.

2. Cone-type Friction Pendulum Bearing System의 이론적 배경

지진발생시 지각은 수평방향과 수직방향으로 진동하며 구조물의 피해를 강요한다. 따라서 양방향의 진동을 분석하여 내진성능을 평가하는 것은 매우 중요할 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 내진설계에서는 구조물이 수직하중으로 설계되므로 수직진동의 영향은 미미하며 건축구조설계기준(KBC-2005)⁽⁴⁾ 등에서도 수평방향의 가속도성분을 이용하여 내진성능을 평가하고 있다. 따라서 수평방향의 가속도를 조사지표로 설정하고 이에 대한 내진성능을 평가하고자 하였다. CFPBS의 내진성능을 평가하는 방법의 일환으로 운동방정식으로부터 이론식을 정립하고 이를 바탕으로 MATLAB7.0을 기반으로 하는 수치해석 프로그램을 제작하였다. Fig. 1은 CFPBS로 구성된 내진장치와 CFPBS마찰면의 돌기를 나타낸 것 이고 Fig. 2는 지진하중작용시의 CFPBS를 나타 낸 것으로서 Fig. 2로부터 운동방정식을 유도하면 식 (1)과 같이 유도할 수 있으며 여기서 m 은 질량, c 는 감쇠계수, k 는 강성이며, $u(t)$ 는 상대변위, $\dot{u}(t)$ 는 상대속도, $\ddot{u}(t)$ 는 상대가속도, $\ddot{u}_g(t)$ 는 지반

가속도이다.

$$m(\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1)$$

CFPBS의 경우 점성감쇠와 강성이 존재하지 않고 마찰력과 중력이 작용하기 때문에 Fig. 3과 같은 자유물체도(free-body diagram)을 그릴 수 있으며 Fig. 3으로부터 식 (2)의 운동방정식을 구할 수 있다. 여기서 N_r 은 비탈면의 수직하중으로 식 (3)과 같다⁽²⁾. 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 식 (4)를 유도할 수 있으며 여기서 μ_r 은 구름마찰계수와 볼 반경의 비⁽⁵⁾이다. 식 (4)와 같이 유도된 CFPBS의 운동방정식과 Newmark- β method를 이용하여 CFPBS의 변위와 속도 및 가속도응답을 구할 수 있는 MATLAB7.0기반의 수치해석 프로그램을 제작하였으며 간편하게 CFPBS의 최대응답가속도 $a_{max, CFPBS}$ 를 계산하기 위한 설계식으로 식 (5)를 제시하였다⁽⁵⁾. 식 (5)에서 $\ddot{u}_{g, max}$ 는 입력지진과의 PGA(peak ground acceleration)이고 θ 는 경사각이다.

$$m\ddot{u}(t) + \mu_r N_r \cos\theta \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) + N_r \sin\theta \operatorname{sgn}(u(t)) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

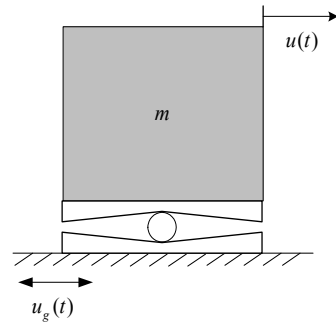


Fig. 2 Simplified model of CFPBS

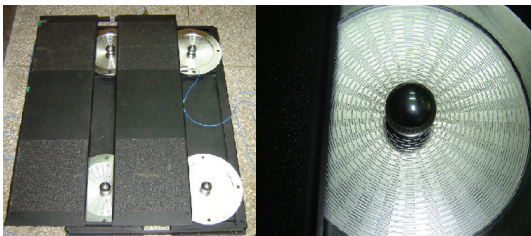


Fig. 1 CFPBS(cone-type friction pendulum bearing system)

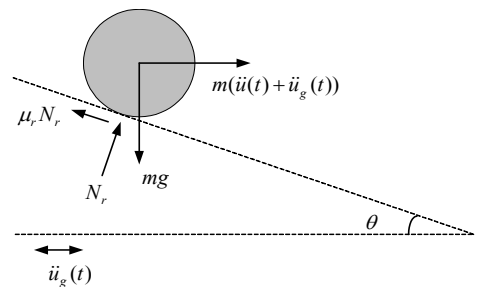


Fig. 3 Free-body diagram of CFPBS

$$N_r = m(g - \ddot{u}_g(t) \tan \theta \operatorname{sgn}(x)) \cos \theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & m\ddot{u}(t) + \mu_r mg \cos^2 \theta \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) \\ & - \mu_r m\ddot{u}_g(t) \sin \theta \cos \theta \operatorname{sgn}(u(t)) \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) \\ & + mg \cos \theta \sin \theta \operatorname{sgn}(u(t)) - m \sin^2 \theta \ddot{u}_g(t) \\ & = -m\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$a_{\max, CFPBS} = \cos^2 \theta (\mu_r + \tan \theta) (g + \ddot{u}_{g, \max} \tan \theta) \quad (5)$$

3. 입력지진파

3.1 인공지진파의 생성

지반운동에 대한 구조물의 동적거동(변위, 속도, 가속도)은 주요 변수인 감쇠비, 고유진동수 및 지반진동가속도에 의하여 결정된다. 다만 같은 감쇠비와

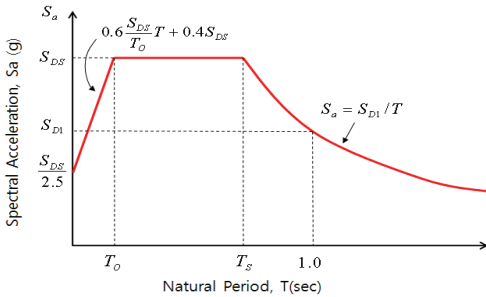


Fig. 4 Design response spectrum(KBC-2005)

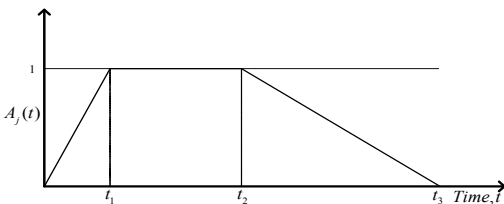


Fig. 5 Envelop function of artificial earthquake

Table 1 Coefficient of envelop function⁽⁷⁾

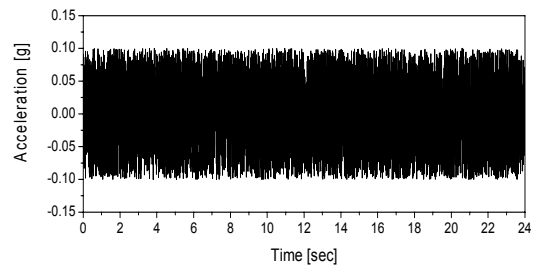
Magnitude	t_1 (s)	$t_2 - t_1$ (s)	$t_3 - t_2$ (s)
7.0-7.5	2	13	9
6.5-7.0	1.5	10	7
6.0-6.5	1	7	5
5.5-6.0	1	6	4
5.0-5.5	1	5	4

1차 고유진동수를 가지는 구조물에 지반진동가속도가 작용할 경우 동적거동과 최대응답은 대상 구조물을 단자유도로 가정하였을 경우와 동일하다고 가정하여 내진설계를 하도록 건축구조설계기준(KBC-2005)은 권장하고 있으며 단자유도구조물에 대한 설계스펙트럼 가속도는 Fig. 4와 같다⁽⁴⁾. 이 논문에서는 건축구조설계기준(KBC-2005)의 제1지진지역, 보통암 지반에 해당하는 최대지진규모(7.0~7.5)의 인공지진파를 제작하기 위하여 Fig. 5의 포락함수를 사용하였으며⁽⁶⁾ 포락함수의 특성을 나타내는 계수는 ASCE standard(1999)⁽⁷⁾에서 제시된 Table 1을 참조하였다.

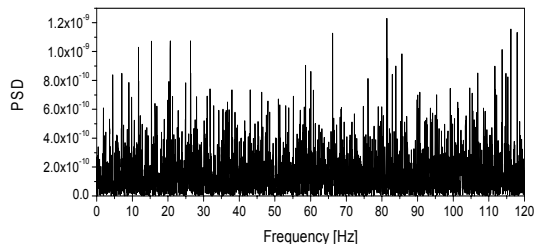
3.2 입력지진파

어느 특정지역에서 예상할 수 있는 지반운동의 특성과 크기를 알아내는 것은 난해한 문제이다. 그러나 과거에 일어난 지진기록을 참고하여 예상되어지는 지진의 피해를 예상 할 수 있다. 따라서 과거 실측된 지진파와 인공지진파를 사용하여 CFPBS의 내진성능을 평가하였다.

Fig. 6은 가진에 의한 실험체의 동특성 변화를 검토하기 위한 백색잡음(white noise)으로서 PGA는 0.1 g이며 대부분의 주파수영역을 포함하고 있음은 Fig. 6(b)에서 알 수 있다.

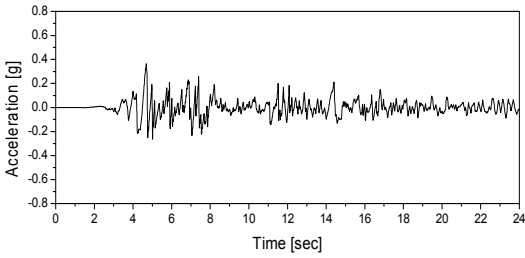


(a) Acceleration signal(PGA=0.1 g)

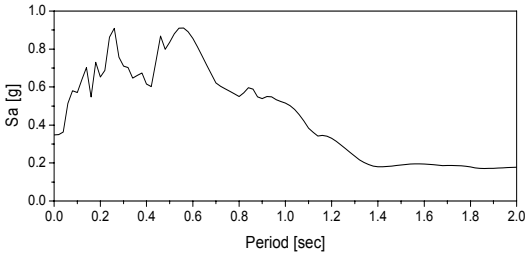


(b) PSD function

Fig. 6 Input white noise

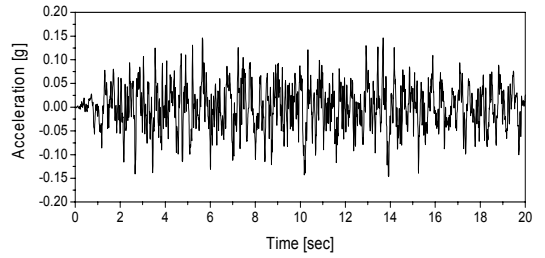


(a) Acceleration signal(PGA=0.348 g)

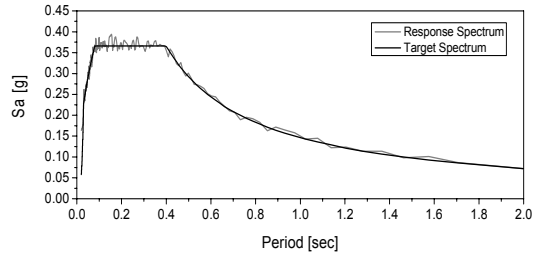


(b) Response spectrum

Fig. 7 El Centro(NS component, 1940)

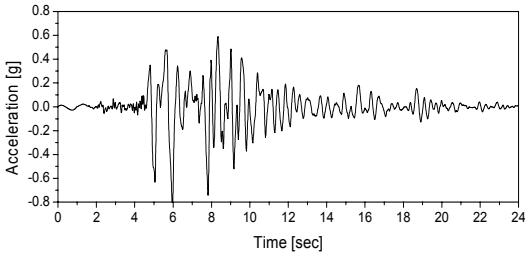


(a) Acceleration signal(PGA=0.154 g)

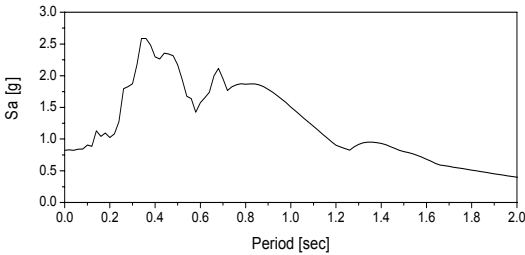


(b) Comparison of target spectrum and response spectrum

Fig. 9 Artificial earthquake



(a) Acceleration signal(PGA=0.835 g)



(b) Response spectrum

Fig. 8 Kobe(NS component, 1995)

과거에 실측된 대표적인 지진파들 중 가속도 응답의 주파수 특성이 포괄적이어서 내진해석에 활용도가 높은 El Centro(NS component, 1940, PGA=0.348 g)와 최근에 국내와 가까운 일본에서 큰 피해를 준 Kobe(NS component, 1995, PGA=0.835 g) 그리고 건축구조설계기준(KBC-2005)의 제1 지진지역의 보통암

지반에서 일어날 수 있는 최대지진규모에 해당하는 인공지진파(PGA=0.154 g)들을 CFPBS의 내진성능을 평가하기 위한 입력지진파로 사용하였다. Figs. 7, 8은 각각 El Centro NS와 Kobe NS지진파이며 Fig. 9와 같은 인공지진파는 동일한 응답스펙트럼을 가지는 지진파의 증폭에 따른 CFPBS의 응답변화를 관찰하기 위하여 1~3배까지 증폭하여 사용되었다.

4. CFPBS의 수치적 동적 해석 및 결과

임의의 μ_r 을 대입하여 구한 수치적 동적해석의 응답신호와 CFPBS의 상부질량을 변화하며 수행한 자유진동 실험으로부터 얻어진 응답신호를 비교대조하여 상부질량의 변화에 따른 μ_r 을 예측하였다. 위와 같은 방법으로 예측된 μ_r 을 이용하여 수치적 동적해석을 수행하였다⁽²⁾.

Fig. 10은 El Centro NS지진파에 대한 CFPBS의 P- δ 곡선으로 변위특성을 알 수 있다. CFPBS는 지진에너지를 소산시켜 구조물을 지진으로부터 보호하는 것이 아니라 마찰면의 기울기와 마찰을 이용하여 구조물의 고유진동수를 변화시켜 응답가속도를 결정하는 내진장치이다. 따라서 Fig. 10과 같이 지진에너지를 소산시키는 능력은 미미하며 원추형의 마찰면으로

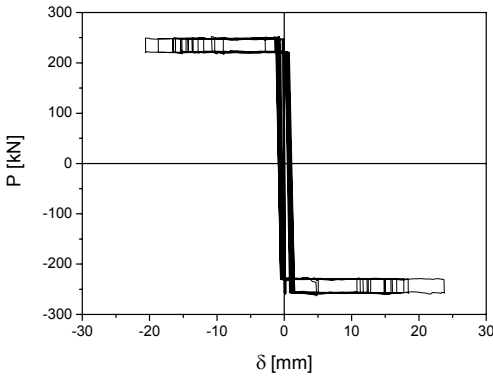
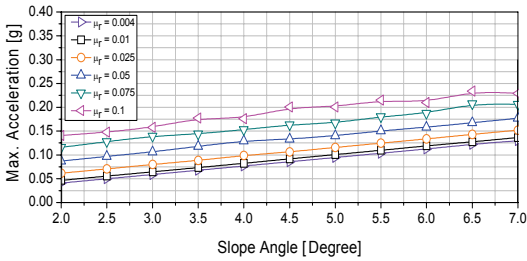
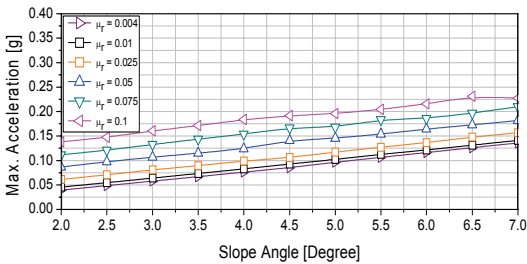


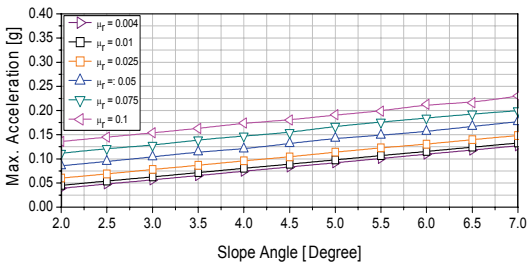
Fig. 10 P- δ curve of CFPBS response with El Centro NS, $\mu_r = 0.004$, $\theta = 4^\circ$



(a) El Centro(NS component, 1940)



(b) Kobe(NS component, 1995)



(c) Artificial earthquake

Fig. 11 Maximum response accelerations from CFPBS based on θ and μ_r .

인한 불연속점이 존재한다. 그리고 불연속점인 원추형 마찰면의 꼭지점을 제외하면 볼의 위치에 상관

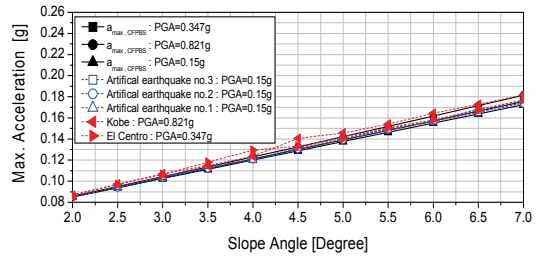


Fig. 12 Comparison of maximum response accelerations from numerical analysis and design equation : $\mu_r = 0.05$

없이 일정한 하중이 작용함을 알 수 있다.

각각의 입력지진파에 대한 수치적 동적해석을 수행하였을 때, CFPBS의 최대절대가속도응답을 CFPBS의 μ_r 과 θ 의 변화에 따라서 정리한 것이 Fig. 11이다. 서로 다른 입력지진파에 대하여 CFPBS의 μ_r 과 θ 가 결정되면 동일한 경향의 최대절대가속도 응답이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 CFPBS의 설계식으로서 제안한 식 (5)를 이용하여 구한 CFPBS의 최대절대가속도응답과 수치적 동적해석으로 구해진 응답을 비교한 것이다. 이때 식 (5)의 $\ddot{u}_{y,max}$ 는 인공지진파, El Centro NS지진파, Kobe NS지진파의 PGA인 0.15 g, 0.347g와 0.821 g를 사용하였고 μ_r 은 임의로 0.05를 대입하였다. Fig. 12와 같이 CFPBS의 기울기와 최대절대가속도응답의 관계를 도식화 하면 식 (5)의 응답과 수치적 동적해석의 응답이 상당히 유사하여 식 (5)는 CFPBS의 성능을 결정하는 설계식으로 타당한 것으로 판단된다.

5. 실시간 진동대실험

5.1 CFPBS 실험모형 및 배치

수치해석 및 실시간 진동대실험에 이용된 CFPBS는 Fig. 13과 같이 마찰면이 원추형으로 제작되어 마찰면의 기울기를 이용하여 지진에 의한 최대가속도응답과 절대변위응답을 조절할 수 있다. 하나의 CFPBS로는 상부구조물의 균형을 잡을 수 없기 때문에 실시간 진동대실험에서는 Fig. 1의 왼쪽그림과 같이 4개의 CFPBS로 구성된 내진장치를 사용하였으며 최대 적재하중은 2000 kg 이상이고 허용 변위는 20 cm이다.

이 연구에서는 마찰면에 음각된 기하학적 무늬가

지진발생시 상부구조물의 운동에 미치는 영향을 파악하기위하여 마찰면에 무늬가 있는 CFPBS와 비교 대조군으로서 마찰면에 무늬가 없는 CFPBS를 준비 하였다. 그리고 일반적으로 사용되는 통신용 랙 (rack)의 무게는 1000 kg이내임에 따라 내진장치 상부에 위치하는 질량 즉, 랙의 무게는 800 kg으로 설정하였으며 지진과 입력 시 내부충돌 등에 의한 노이즈를 방지하기 위해 내부에 콘크리트를 타설하여 질량을 확보하였다.

실시간 진동대실험의 진동응답측정에 사용된 가속도 센서는 PCB 603C11로서 측정범위(measurement range)는 ± 50 g이며 측정범위주파수(frequency range)는 0.5~1000 Hz이다. 4개의 가속도센서를 내진장치의 상판에 2축 방향으로 각각 2개씩 부착하여 지진동에 의한 CFPBS의 응답가속도를 측정하였다. 편의상 Fig. 14에서 횡 방향을 x축, 종 방향을 y축으로 정의하였다. CFPBS내진장치와 800 kg의 랙으로 이루어진 실험체는 Fig. 14와 같이 랙의 길이 방향인 x축을 향하도록 배치하였다.

5.2 실시간 진동대실험

실시간 진동대실험은 부산대학교 양산캠퍼스에 위치한 지진방재연구센터의 3자유도 진동대 시스템인

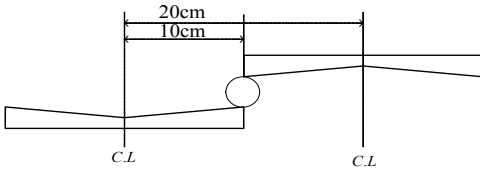


Fig. 13 Cross-section diagram of CFPBS

진동대 B에서 수행되었으며 진행순서는 Table 3과 같다. 진동대 B는 4기의 유압기와 balanced bearing, 진동대, parking frame, 유압호스로 구성되어 있으며 이러한 시스템은 이동시 일체화가 가능하여 짧은 시간에 위치 변경이 가능하다. 그리고 balanced bearing의 도입으로 유압시스템을 가동하지 않고도 시험체 설치 등의 작업을 진행할 수 있다.

일반적으로 내진설계에서는 구조물이 수직하중으로 설계되므로 수직진동의 영향은 미미하며 건축구조설계기준(KBC-2005) 등에서도 수평방향의 가속도성분을 이용하여 내진성능을 평가하고 있다. CFPBS의 경우 대상이 되는 상부구조물 즉, 통신장비용 랙의 무게는 1000 kg내외이며 통신장비용 랙의 특성상 설치되는 위치는 지층일 경우가 대부분이므로 지진으로부터 발생하는 연직가속도의 영향은 배제하고 수평방향의 가속도를 조사지표로 설정하고 이에 대한 감소효과를 평가하고자 하였다.

Table 3 Plan of shake table test

Load case	Details
1	· Ambient test using white noise signals · Uni-axial test(x direction)
2	· Artificial earthquake(scale up : $\times 1 \sim 3$) · Uni-axial test(x direction)
3	· Artificial earthquake(scale up : $\times 1 \sim 3$) · Bi-axial test(x, y direction)
4	· El Centro(NS component, PGA=0.348 g) · Uni-axial test(x direction)
5	· Kobe(NS component, PGA=0.835 g) · Uni-axial test(x direction)
6	· Ambient test using white noise signals · Uni-axial test(x direction)

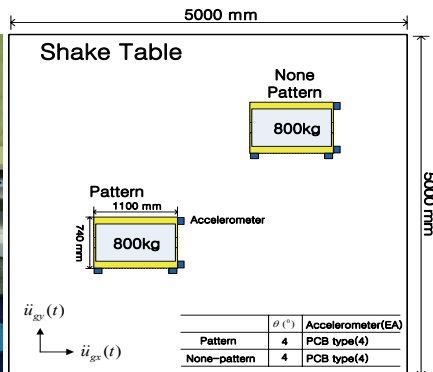


Fig. 14 CFPBS and accelerometers arrangement for shake table test

실시간 진동대실험으로 인한 실험전후의 CFPBS의 동특성 변화를 검토하기 위해 단축(x축)에 대해 백색잡음에 의한 가진 실험이 수행되었다. CFPBS의 경우 마찰면이 원추형으로 설계되어 모든 수평방향에 대하여 동일한 성능을 가질 것으로 예측됨에 따라 실측 지진파인 El Centro NS, Kobe NS지진파를 이용한 진동대실험의 경우 단축으로만 진행되었다. 단, 인공지진파의 경우 2축진동이 CFPBS의 응답에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위하여 단축과 2축(x,y)진동을 모두 수행하였다.

6. 실시간 진동대실험 결과

6.1 실시간 진동대실험에 의한 동특성 변화

실시간 진동대실험으로 인한 CFPBS의 동특성 변화를 검토하기 위하여 실험전 Fig. 6의 PGA가 0.1 g인 백색잡음에 의한 가진 실험을 수행하였으며 실험 후 실험체에 별도의 조치를 취하지 않고 동일한 백색잡음에 의한 가진 실험을 실시하였다. Fig. 15와 16은 CFPBS의 실험 전 후의 가속도 응답을 앙상블 평균(ensemble average)하여 PSD함수(power spectral density function)로 나타낸 것으로 볼의 위치에 따라 고유진동수가 변화하는 CFPBS의 특징에

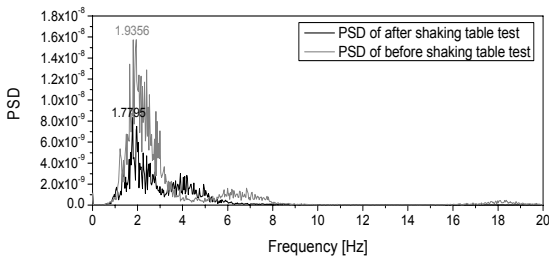


Fig. 15 PSD function of acceleration signals from ambient test : non-patterned CFPBS

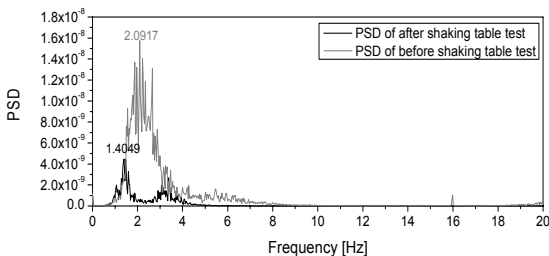
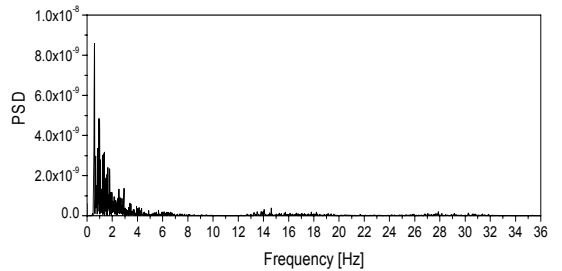


Fig. 16 PSD function of acceleration signals from ambient test : patterned CFPBS

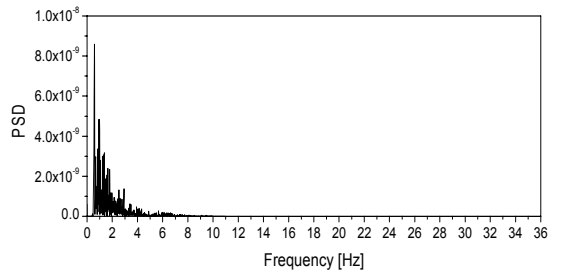
따라 고유진동수가 특정주파수에 집중하여 나타나지 않고 1~10 Hz에 걸쳐 변화하는 것을 알 수 있다. 무늬가 없는 CFPBS의 경우 실험전후의 고유진동수가 분포된 경향이 유사하여 상부질량의 영향으로 인하여 볼에 의한 마찰면의 패임 현상이 CFPBS의 동특성변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 하지만 무늬가 있는 CFPBS의 경우 상부질량과 볼에 의한 마찰면 패임 현상이 마찰면의 무늬를 변형시켜 CFPBS의 동특성에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

6.2 실시간 진동대실험의 가속도응답

Table 3의 순서로 실시간 진동대실험을 수행하였으며 진동대의 가속도 데이터와 실험체에 설치된 가속도센서로부터 얻어진 가속도 데이터 중 각 축방향에 대하여 가장 큰 값을 가지는 가속도신호를 CFPBS의 수치적 동적해석 결과와 비교대조를 위하여 사용하였다. Fig. 17과 18은 인공지진파(uni-axial test $\times 1.5$, PGA=0.225 g)가진 시 CFPBS의 응답 가속도신호의 PSD함수로 0.5~10 Hz영역이 기여도가 큰 모드로 판단되며 진자가 아닌 일정한 기울기를

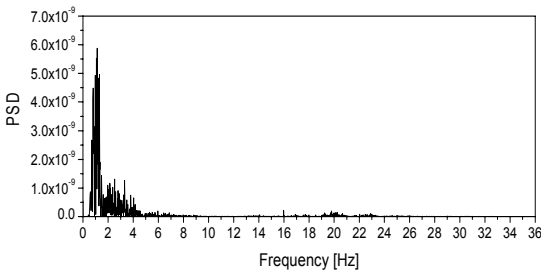


(a) PSD function of acceleration signals

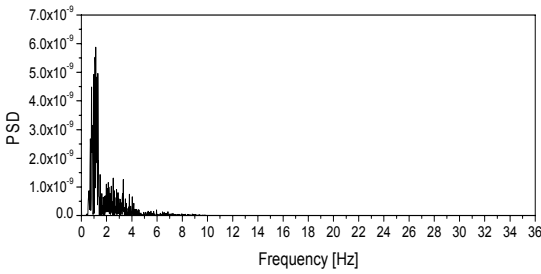


(b) PSD function of 10 Hz low pass filtered acceleration signals

Fig. 17 Comparison of signals from non-patterned CFPBS : artificial earthquake uni-axial test $\times 1.5$, PGA=0.225 g



(a) PSD function of acceleration signals



(b) PSD function of 10 Hz low pass filtered acceleration signals

Fig. 18 Comparison of signals from patterned CFPBS : artificial earthquake uni-axial test $\times 1.5$, $PGA = 0.225\text{ g}$

Table 4 Results of shake table test(slope $\theta = 4^\circ$, 10 Hz low pass filtered signal)

	Table motion PGA[g]		Response signals of CFPBS			
			None-pattern $a_{max}[g]$		Pattern $a_{max}[g]$	
	Direction		Direction		Direction	
	X	Y	X	Y	X	Y
Artificial Uni $\times 1$	0.16		0.17		0.15	
Artificial Uni $\times 1.5$	0.25		0.16		0.15	
Artificial Uni $\times 2$	0.32		0.18		0.16	
Artificial Uni $\times 2.5$	0.40		0.12		0.15	
Artificial Uni $\times 3$	0.48		0.18		0.18	
Artificial Bi $\times 1$	0.16	0.16	0.16	0.23	0.11	0.14
Artificial Bi $\times 1.5$	0.24	0.24	0.13	0.19	0.15	0.21
Artificial Bi $\times 2$	0.32	0.32	0.09	0.12	0.13	0.19
Artificial Bi $\times 2.5$	0.40	0.40	0.07	0.04	0.10	0.13
Artificial Bi $\times 3$	0.48	0.48	0.07	0.06	0.10	0.09
El Centro NS	0.35		0.06		0.14	

가지는 CFPBS의 특성으로 인하여 CFPBS의 고유진동수는 4 Hz 이하의 낮은 주파수영역에 집중하여 존재하게 된다. 따라서 10 Hz를 초과하는 모드는 마찰면의 무늬와 기타 환경에 의한 노이즈로 판단하여 모든 응답신호에 대하여 10 Hz low pass filter를 적용하였다.

Table 4는 실시간 진동대실험의 결과로서 Kobe NS지진파의 경우 진동대실험 중 허용변위를 초과하여 불과 마찰면의 이탈방지턱과의 충격이 발생하여 기록하지 않았다. Table 4의 결과로부터 CFPBS는 규모가 작은 지진에 대하여 내진성능이 미약하지만 입력지진파의 PGA가 0.3 g를 초과하는 큰 규모의 지진에 대하여 뛰어난 내진성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

7. 수치적 동적 해석과 실시간 진동대실험 결과 분석

전범규 등에 의해 수행되어진 CFPBS의 수치적 동적 해석과정에서 μ_r 은 구름마찰계수와 볼 반경의 비로 정의되었다. 원추형 마찰진자베어링의 내진성능평가⁽²⁾에 따르면 기울기가 4° 이고 마찰면에 무늬가 있는 CFPBS 4개로 구성된 내진장치위에 800 kg의 질량이 올려 질 경우 μ_r 값은 0.011이다.

$$\gamma = \left(1 - \frac{a_{max, CFPBS}}{u_{g, max}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Table 4와 같이 실시간 진동대실험으로 부터 얻어진 가속도 데이터에 10 Hz low pass filter를 적용한 후 식 (6)을 이용하여 감소율 γ 로 변환한 후 설계식과 수치적 동적해석으로부터 구해진 감소율과 비교한 것이 Fig. 19이다. 단 허용변위를 초과하였던 Kobe NS지진파의 응답은 제외하였다. 무늬가 없는 CFPBS가 무늬가 있는 것에 비하여 0.3 g 이상의 지진에 대해 우수한 진동제어성능을 가지며 μ_r 을 0.011로 가정하여 수행된 수치적 동적 해석 결과와 유사하나 낮은 수준의 지진의 경우 그 경향이 상이하며 오히려 응답 가속도가 입력가속도보다 크게 증폭되어 나타나 취약함을 알 수 있다. 마찰면에 무늬가 있는 CFPBS의 경우 PGA가 0.3 g를 초과하는 입력 지진파에 대하여 60% 이상의 감소율을 가지며

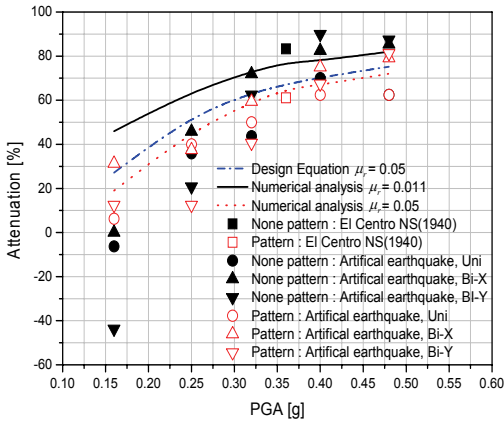


Fig. 19 Comparison of attenuations from numerical analysis and seismic test : 10 Hz low pass filtered signals

μ_r 이 0.05인 수치적 동적 해석 결과 및 설계식의 감소율과 유사하게 나타났다. 실시간 진동대실험의 경우 한축으로만 운동하는 자유진동실험과 달리 편심하중 등의 효과에 의하여 회전하게 됨에 따라 자유진동으로부터 유추한 이상적인 μ_r 보다 큰 값이 나타나게 된 것으로 판단된다. 따라서 구름마찰계수와 볼 반경의 비인 μ_r 의 보완이 이루어진다면 설계식을 이용하여 수치 해석과 실험 등의 복잡한 과정을 거치지 않고 CFPBS의 내진성능을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 결 론

이 연구에서는 CFPBS의 운동방정식을 유도하고 MATLAB7.0을 기반으로 하는 수치 해석프로그램을 제작하였다. 그리고 CFPBS의 응답가속도를 결정할 수 있는 설계식을 제안하였으며 수치해석프로그램을 이용한 매개변수연구와 실시간 진동대실험을 통하여 CFPBS의 설계식의 타당성과 내진성능검증을 검증하였다.

실시간 진동대실험으로부터 얻어진 응답가속도 신호는 원추모양의 마찰면으로 인하여 발생하는 불연속점과 무늬 등으로 인해 발생하는 노이즈가 포함되어있는 것으로 판단된다. 따라서 10 Hz를 초과하는 모드는 마찰면의 무늬와 기타 환경에 의한 노이즈로 판단하여 모든 응답신호에 대하여 10 Hz low pass filter를 적용하였다.

10 Hz low pass filter를 적용한 응답가속도신호를 분석하였을 경우 무늬가 있는 CFPBS는 수치적 동적해석과 설계식 및 실시간 진동대실험으로부터 구해진 감소율의 경향이 근사하여 이론적으로 접근한 CFPBS의 알고리즘은 설득력이 있는 것으로 판단된다.

사용된 실험체의 하중은 800 kg으로 자유진동실험으로부터 유추된 무늬가 있는 CFPBS의 μ_r 은 0.011이다. 하지만, 실험결과 무늬가 있는 CFPBS의 응답은 μ_r 이 0.05인 수치적 동적해석 및 설계식의 응답과 유사하게 나타났다. 실시간 진동대실험의 경우 한축으로만 운동하는 자유진동실험과 달리 편심하중에 의한 내진장치의 회전에 의하여 자유진동으로부터 유추한 이상적인 μ_r 보다 큰 값이 나타나게 된 것으로 판단되며 차후 구름마찰계수와 볼 반경의 비인 μ_r 의 보완이 이루어진다면 설계식을 이용하여 간단히 CFPBS의 내진성능을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 (주)엔타이어세이프시스템의 연구비에 의하여 연구되었습니다. 또한 실험체 제작 및 설치에 도움을 주신 김준성 대표와 정득영 이사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Zayas, V., Low, S. S. and Mahin, S. A., 1987, The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report, Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- (2) Jeon, B. G., Jang, S. J., Park, K. R., Kim, N. S. and Jung, D. Y., 2011, Seismic Performance Evaluation of Cone-type Friction Pendulum Bearing System, Journal of Earthquake Engineer Society of Korea, Vol. 15, No. 2, pp. 23~33.
- (3) Lee, H. S., Kim, M. G. and Cho, C. D., 2005, Seismic Analysis on a Control Panel of(nuclear) Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 6, pp.

652~659.

(4) Architectural Institute of Korea, 2005, Korea Building Code, Kimoondang Publishing Co., Seoul.

(5) Tasi, M.-H., Wu, S.-Y., Chang, K.-C. and Lee, G. C., 2007, Shaking Table Test of a Scaled Bridge Model with Rolling-type Seismic Isolation Bearings, Engineering Structures, Vol. 29, No. 5, pp. 694~702.

(6) Kim, N. S, Kim, Kim, J. M. and Lee, G. H., 2004, A Study on Artificial Earthquake Generation for Time History Analysis of Seismically Isolated Bridges, Research Institute of Industrial Technology, PNU.

(7) ASCE Standard, 1999, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, ASCE.