

진동대실험을 통한 원추형 마찰진자베어링의 내진성능 평가

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

전법규* · 장성진* · 김남식†

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

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

ABSTRACT

Existing FPS(Friction Pendulum System) is isolation system which is possible to isolate structures by pendulum characteristic from ground vibration. Structural natural frequency could be decided 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 response acceleration and displacement 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, Divergence of response could be controlled by CFPBS which had constantly changing natural frequency with low modal participation factor in wide-range. In this study, Seismic performance of CFPBS was evaluated by numerical analysis and shaking table test.

1. 서 론

지진격리장치 중 Zayas et al(1987)⁽¹⁾에 의하여 제안되어진 FPS(Friction Pendulum System)는 마찰판의 곡률반경과 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 예측하는 것은 난해하다. 그리고 만약 지진의 유효주기가 FPS의 진자특성에 의해 결정되어진 구조물의 고유주기와 일치하면 공진이 발생할 수도 있을 것으로 사료된다. 따라서 가변적인 고유진동수를 가져 특정 주파수에 응답특성을 집중시키지 않는 내진장치인

CFPBS(Cone-type Friction Pendulum Bearing System)를 개발하고 자유진동실험과 수치적 동적해석을 통하여 그 성능을 검증하였다. CFPBS는 마찰면을 원추형으로 설계하여 볼의 위치에 따라 고유진동수가 변화하는 특성이 있고 지진동에 의한 최대가속도응답과 절대변위응답을 조절할 수 있다.⁽²⁾⁽³⁾

본 논문에서는 실측 지진파 및 인공지진파를 이용한 실시간 진동대실험을 수행하여 CFPBS의 이론적 모델을 이용한 수치적 동적해석결과의 타당성을 검토하고 CFPBS의 내진성능을 평가하였다.

2. 입력 지진파

2.1 인공지진파의 생성

지반운동에 대한 구조물의 동적거동(변위, 속도, 가속도)은 주요 변수인 감쇠비, 고유진동수 및 지반진동 가속도에 의하여 결정된다. 다만 같은 감쇠비와 1차 고유진동수를 가지는 구조물에 지반진동가속도가 작용할 경우 동적거동과 최대응답은 대상 구조물을 단

* 부산대학교 사회환경시스템공학과

† 교신저자; 정희원, 부산대학교 사회환경시스템공학부

E-mail : nskim@pusan.ac.kr

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

자유도로 가정하였을 경우와 동일하다고 가정하여 내진설계를 하도록 건축구조설계기준(KBC-2005)은 권장하고 있으며 단자유도구조물에 대한 설계스펙트럼 가속도는 figure 1과 같다.⁽⁴⁾ 본 논문에서는 건축구조설계기준(KBC-2005)의 제 1 지진지역, 보통암 지반에 해당하는 최대지진규모(7.0~7.5)의 인공지진파를 제작하기 위하여 figure 2의 포락함수를 사용하였으며⁽⁵⁾ 포락함수의 특성을 나타내는 계수는 ASCE standard(1999)⁽⁶⁾에서 제시된 table 1을 참조하였다.

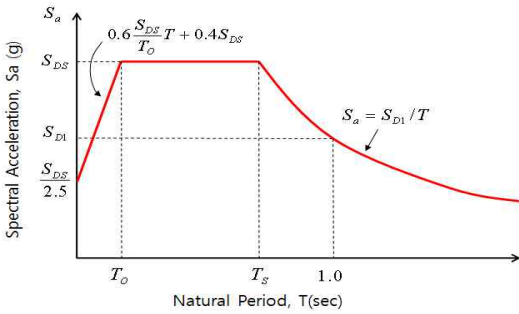


Figure 1. Design response spectrum(KBC-2005)

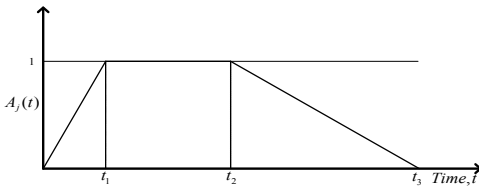


Figure 2. Envelop function of artificial earthquake

Table 1. Coefficient of envelop function (ASCE Standard, 1999)

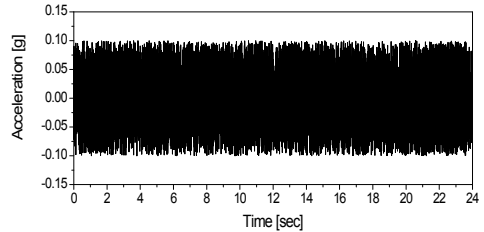
Magnitude	t_1	$t_2 - t_1$	$t_3 - t_2$
7.0-7.5	2	13	9
6.5-7.0	1.5	10	7
6.0-6.5	1	7	5
5.5-6.0	1	6	4
5.0-5.5	1	5	4

2.2 입력 지진파

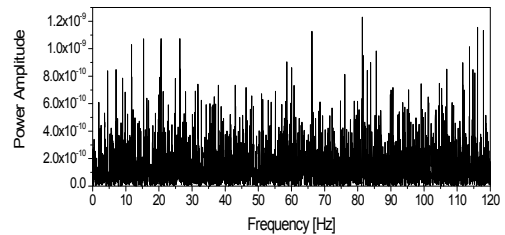
어느 특정지역에서 예상할 수 있는 지반운동의 특성과 크기를 알아내는 것은 난해한 문제이다. 그러나 과거에 일어난 지진기록을 참고하여 예상되어지는 지진의 피해를 예상 할 수 있다. 따라서 과거 실측된 지진파와 인공지진파를 사용한 실시간 진동대실험을

수행하여 CFPBS제품의 내진성능을 평가하였다.

Figure 3은 가진에 의한 실험체의 동특성 변화를 검토하기 위하여 사용될 백색잡음(white noise)으로서 PGA(Peak Ground Acceleration)는 0.1g이며 대부분의 주파수영역을 포함하고 있음을 figure 3(b)에서 알 수 있다.

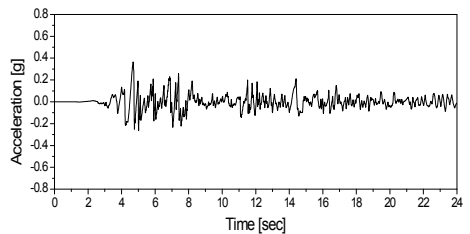


(a) Acceleration signal

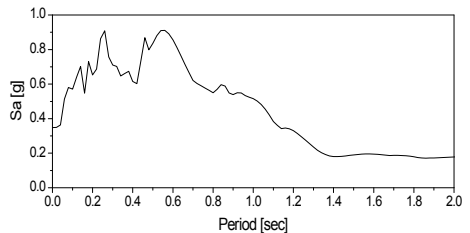


(b) Power spectrum

Figure 3. Input white noise(PGA=0.1g)

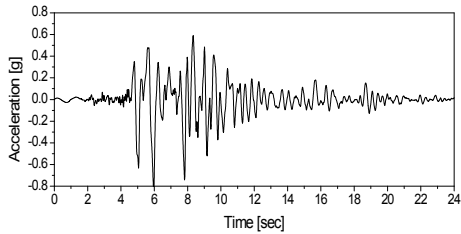


(a) Acceleration signal

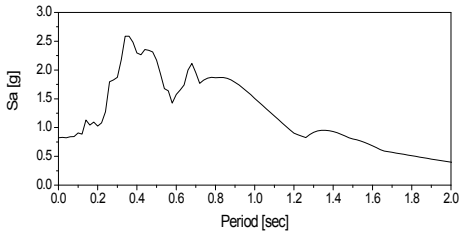


(b) Response Spectrum

Figure 4. El Centro(NS component, 1940, PGA=0.348g)

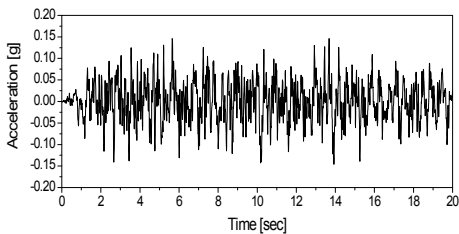


(a) Acceleration signal

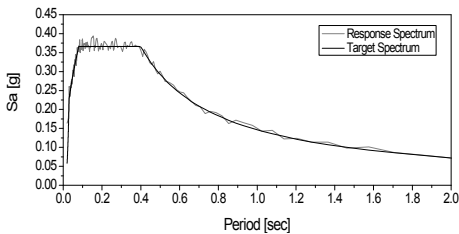


(b) Response Spectrum

Figure 5. Kobe(NS component, 1995, PGA=0.835g)



(a) Acceleration signal



(b) Comparison of target spectrum and response spectrum

Figure 6. Artificial earthquake(PGA=0.154g)

Figure 4~6은 실시간 진동대실험에서 사용될 지진파와 응답스펙트럼들로서 대표적인 실측 지진파인 El Centro(NS component, 1940, PGA=0.348g)와 Kobe(NS component, 1995, PGA=0.835g) 그리고

건축구조설계기준(KBC-2005)의 제 1 지진지역의 보통암 지반에서 일어날 수 있는 최대지진규모에 해당하는 인공지진파(PGA=0.154g)이다. Figure 6의 인공지진파는 동일한 응답스펙트럼을 가지는 지진파의 증폭에 따른 CFPBS의 응답변화를 관찰하기 위하여 1~3배까지 증폭하여 사용되었다.

3. 실시간 진동대실험

3.1 CFPBS 실험모형 및 배치

CFPBS는 figure 7과 같이 마찰면이 원추형으로 제작되었으며 허용 변위는 20cm이다. 마찰면의 기울기를 이용하여 지진에 의한 최대가속도응답과 절대변위응답을 조절할 수 있다. Figure 8은 4°의 기울기를 가지는 4개의 CFPBS로 구성된 내진장치이며 마찰면에 기하학적인 무늬를 음각하여 작은 규모의 지진 발생시 지진동으로 인해 상부구조물로 전달되는 응답가속도가 증폭되는 것을 방지하고자 하였다. 본 연구에서는 마찰면에 음각된 기하학적 무늬가 지진발생시 상부구조물의 운동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 마찰면에 무늬가 있는 CFPBS와 없는 것 두 가지를 준비하였다.

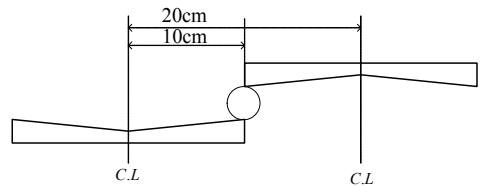


Figure 7. Cross-section diagram of CFPBS



Figure 8. CFPBS seismic isolation system

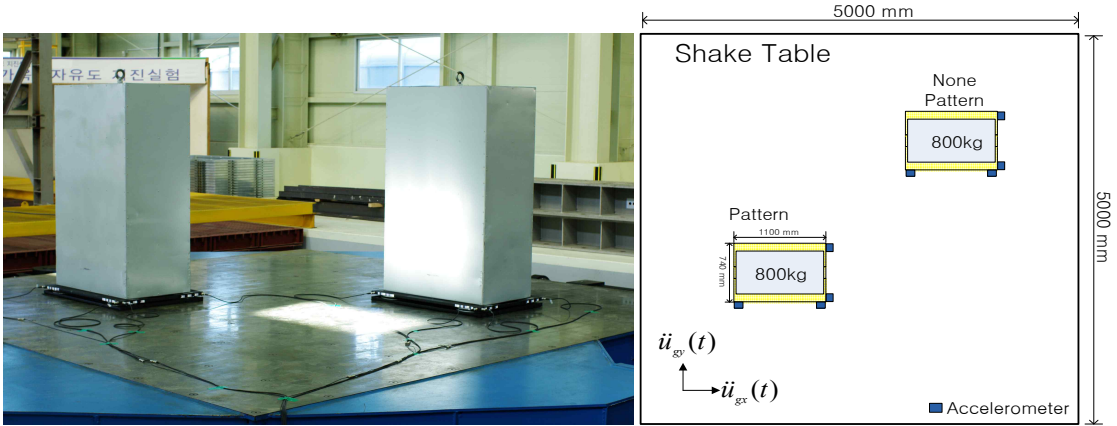


Figure 9. The arrangement of the CFPBS and accelerometers on the shake table

내진장치 상부에 위치하는 질량 즉, 랙(rack)의 무게는 800kg이며 지진과 입력 시 내부충돌 등에 의한 노이즈를 방지하기 위해 내부에 콘크리트를 타설하여 질량을 확보하였다. 측정에 사용된 가속도 센서는 PCB 603C11로서 측정범위(measurement range)는 $\pm 50g$ 이며 측정범위주파수(frequency range)는 0.5~1000Hz이다. 4개의 가속도센서를 내진장치의 상판에 2축 방향으로 각각 2개씩 부착하여 지진동에 의한 CFPBS의 응답가속도를 측정하였다. 편의상 figure 9에서 횡 방향을 x축, 종 방향을 y축 으로 정의하였다. CFPBS내진장치와 800kg의 랙으로 이루어진 실험체는 figure 9와 같이 진동대 위에 배치하였다.

3.2 실시간 진동대실험

실시간 진동대실험은 부산대학교 양산캠퍼스에 위치한 지진방재연구센터의 3자유도 진동대 시스템인 진동대 B에서 수행되었다. 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.

지진발생시 지각은 수평방향과 수직방향으로 진동하며 구조물의 피해를 강요한다. 따라서 양방향의 진동을 분석하여 내진성을 평가하는 것은 매우 중요할 것으로 판단되므로 실제 지진에 대한 CFPBS의 성능검증과 선행연구 결과와의 비교대조를 위해서 단축가진과 2축가진 두 가지 방법으로 실험을 수행하였다.

실시간 진동대실험으로 인한 실험체의 동특성 변화를 검토하기 위하여 단축(x축)에 대해 백색잡음에 의한 가진 실험이 수행되었다. El Centro NS, Kobe NS 파를 이용한 진동대실험의 경우 단축(x축)으로만 진행되었다. 인공지진파는 단축(x축)과 2축(x,y)진동을 모두 수행하였으나 수직진동의 영향은 고려하지 않았다. 마찰진자베어링의 내진성능평가를 위 실시간 진동대실험의 진행순서는 table 3과 같다.

Table 3. Plan of shaking 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=0.348g) · Uni-axial test (x direction)
5	· Kobe(NS component, PGA=0.835g) · Uni-axial test (x direction)
6	· Ambient test using white noise signals · Uni-axial test (x direction)

4. 실시간 진동대실험 결과

4.1 실시간 진동대실험에 의한 동특성 변화

실시간 진동대실험으로 인한 CFPBS의 동특성 변화를 검토하기 위하여 PGA가 0.1g인 백색잡음에 의한 가진 실험을 수행하였다. Figure 10은 마찰면에 무늬가 없는 CFPBS의 실험 전 후의 가속도 응답을

양상블 평균(ensemble average)하여 PSD함수 (Power Spectral Density function)로 나타낸 것이다. Figure 10과 11로부터 실험에 사용된 4°의 기울기를 가지는 CFPBS는 볼의 위치에 따라서 고유진동수가 1~10Hz에 걸쳐 변화하는 것을 알 수 있다. CFPBS의 실험후 고유진동수 분포영역은 실험전 영역에 포함되지만 그 형상은 같지 않음을 figure 10과 figure 11을 통하여 알 수 있으며 특히 마찰면에 무늬가 있는 CFPBS의 경우에 동특성변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 실시간 진동대실험시 상부질량에 의해 볼이 마찰면을 누름으로써 마찰면과 음각되어진 무늬에 패임 현상이 나타나 CFPBS의 고유특성이 변화한 것으로 판단된다.

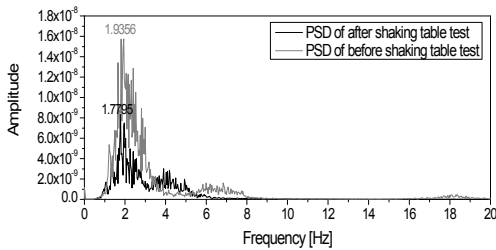


Figure 10. Ambient test results of none-patterned CFPBS

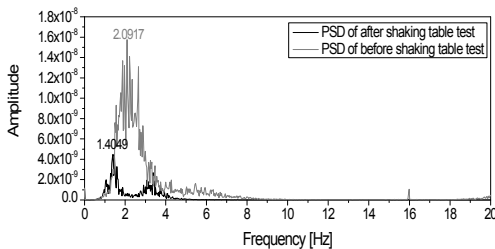


Figure 11. Ambient test results of patterned CFPBS

4.2 실시간 진동대실험의 가속도응답

각 실험체의 응답 가속도 중 가장 큰 값을 가지는 가속도신호를 사용하였으며 실험으로부터 얻어진 응답가속도신호는 원추모양의 마찰면의 불연속점과 마찰면의 무늬에 의한 발생하는 노이즈가 포함되어있는 것으로 판단된다. 따라서 10Hz를 초과하는 모드는 마찰면의 무늬와 기타 환경에 의한 노이즈로 판단하여 모든 응답신호에 대하여 10Hz low pass filter를 적용하였다. 아래의 table 4는 실시간 진동대실험의

결과이며 Kobe NS과의 경우 진동대실험 중 허용변위를 초과하여 table 4에 기록하지 않았다. Table 4의 결과로부터 CFPBS는 규모가 작은 지진에 대하여 내진성능이 미약하지만 입력지진과의 PGA가 0.3g를 초과하는 큰 규모의 지진에 대하여 뛰어난 내진성능을 발휘하는 것을 알 수 있다. 무늬가 없는 CFPBS는 작은 규모의 지진의 응답에서 입력지진파를 증폭시키는 경향이 나타나기도 하지만 무늬가 있는 것에 비하여 규모가 큰 지진에 대한 내진성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

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

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

5. 수치해석과 실시간 진동대실험결과 분석

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

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

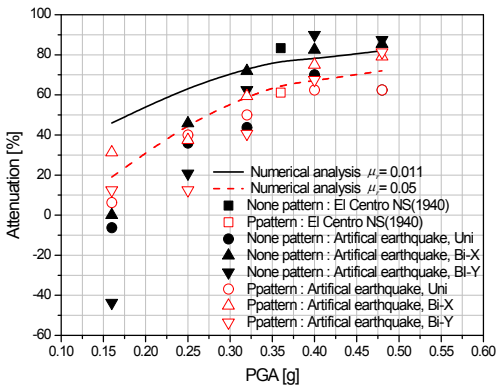


Figure 12. Comparison of attenuations of numerical analysis and seismic test : 10Hz low pass filtered signals

실시간 진동대실험으로부터 얻어진 가속도 데이터에 10Hz low pass filter를 적용한 후 식(1)을 이용하여 감소율 γ 로 변환하고 입력 지진파의 PGA에 따라 도식화 한 것이 figure 12 이다. 무늬가 없는 CFPBS가 무늬가 있는 것에 비하여 0.3g 이상의 지진에 대해 우수한 진동제어성능을 가지며 μ_r 을 0.011로 가정하여 수행된 수치적 동적해석결과와 유사하나 낮은 수준의 지진의 경우 그 경향이 상이하며 오히려 응답 가속도가 입력가속도보다 크게 증폭되어 나타나 취약함을 알 수 있다. 마찰면에 무늬가 음각된 CFPBS의 경우 PGA가 0.3g를 초과하는 입력 지진파에 대하여 60%이상의 감소율을 가지며 μ_r 이 0.05인 수치적 동적해석결과와 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.

8. 결 론

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

10Hz low pass filter를 적용한 응답가속도신호를 분

석하였을 경우 무늬가 없는 CFPBS는 PGA가 0.3g를 초과하는 강한 지진파에 대하여, 마찰면에 무늬를 가지는 CFPBS의 경우 PGA가 0.4g를 초과하는 입력 지진파에 대하여 70%이상의 응답감소율을 가진다. 따라서 일정수준 이상의 지진에 대하여 진동제어성능이 뛰어난을 알 수 있으며 무늬가 있는 CFPBS는 μ_r 이 0.05인 수치적 동적해석의 결과와 실시간 진동대실험결과의 경향이 근사하여 이론적으로 접근한 CFPBS의 알고리즘은 설득력이 있는 것으로 판단된다.

사용된 실험체의 하중은 800kg으로 자유진동실험으로부터 유추된 무늬가 있는 CFPBS의 μ_r 은 0.011이다. 하지만, 실험결과 무늬가 있는 CFPBS의 응답은 μ_r 이 0.05인 수치적 동적해석결과와 유사하게 나타났다. 실시간 진동대실험의 경우 한축으로만 운동하는 자유진동 실험과 달리 편심하중에 의한 내진장치의 회전에 의하여 자유진동으로부터 유추한 이상적인 μ_r 보다 큰 값이 나타나게 된 것으로 판단된다.

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) 전범규, 장성진, 박경록, 김남식, 정득영, 2011, 원추형 마찰진자베어링의 내진성능 평가, 한국지진공학회, 15권, 제2호(계제예정).
- (3) 김남식, 전범규, 장성진, 2010, 마찰진자베어링의 내진성능평가기술 개발, 부산대학교 지진방재연구센터.
- (4) 대한건축학회, 2005, (건설교통부고시)건축구조설계기준, 기문당.
- (5) 김남식, 김재민, 이계희, 2004, 지진격리교량의 시간이력해석을 위한 인공지진파 작성 연구, 부산대학교 생산기술연구소.
- (6) ASCE Standard, 1999, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, ASCE.