

원추형 마찰진자베어링의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of a Cone-type Friction Pendulum Bearing System

전법규¹⁾ · 장성진²⁾ · 박경록³⁾ · 김남식⁴⁾ · 정득영⁵⁾

Jeon, Bub Gyu · Chang, Sung Jin · Park Kyung Rock · Kim, Nam Sik · Jung, Duk Young

국문 요약 >> 본 연구에서는 중요 통신장비의 지진발생시 파손 및 성능저하를 방지하기 위하여 구조물로 전달되는 가속도를 조절할 수 있는 CFPBS(Cone-type Friction Pendulum Bearing System:원추형 마찰진자베어링)를 개발하고 내진성능을 검증하였다. CFPBS는 기존의 FPS(Friction Pendulum System)와 다르게 원추형으로 제작되었으며 보다 큰 마찰력을 얻기 위하여 마찰면에 패턴을 음각하였다. CFPBS의 고유성능을 파악하기 위하여 4개의 CFPBS가 하나의 개체를 이루도록 제작된 지진격리장치를 이용하여 자유진동시험을 수행하였다. 운동방정식으로부터 유도된 CFPBS의 이론식과 Newmark- β Method를 이용하여 내진성능을 검증하기위한 MATLAB7.0 기반의 동적 수치해석프로그램을 제작하였으며 CFPBS의 제작 시 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 간략화된 CFPBS의 설계식을 제안하였다. 수치해석을 통한 CFPBS의 내진성능평가를 위하여 건축구조설계기준(KBC-2005)의 최대지진규모에 해당하는 인공지진파를 생성하고 검증하였다. El Centro NS(1940)와 Kobe NS(1995), 인공지진파 등을 사용하여 CFPBS의 상부질량과 경사각을 매개변수로 하는 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 결과를 토대로 CFPBS의 내진성능을 평가하였으며 수치해석의 결과와 설계식을 이용하여 동일한 조건에서 얻어진 결과를 비교분석하였다.

주요어 원추형마찰진자, 지진격리장치, 인공지진파, 수치해석, 감소를

ABSTRACT >> In this study, a CFPBS (Cone-type Friction Pendulum Bearing System) was developed which controls the acceleration delivered to the structure to prevent damage and degradation of the critical communication equipment in case of an earthquake. The isolation performance of the CFPBS was evaluated by numerical analysis. The CFPBS was manufactured in the shape of a cone differenced from the existing FPS (Friction Pendulum System), and a pattern was engraved on the friction surface. The natural frequencies of the CFPBS were evaluated from a free-vibration test with the seismic isolator system consisting of four CFPBSs. In order to verify its earthquake-resistant performance, a numerical analysis program was created from the equation of the CFPBS induced from the equations of motion. A simplified theoretical equation of the CFPBS was proposed to manufacture the equipment which could demonstrate the necessary performance. Artificial seismic waves satisfying the maximum earthquake scale of the Korean Building Code-Structural (KBC-2005) were created and verified to review the earthquake-resistant performance of the CFPBS by numerical analysis. The superstructural mass of the CFPBS and skew angle of the friction surface were considered for numerical analysis with El Centro NS (1940), Kobe NS (1995) and artificial seismic waves. The CFPBS isolation performance evaluation was based on the results of numerical analysis and the executed comparative analysis between the results from numerical analysis and the simplified theoretical equation under the same conditions.

Key words Friction Pendulum System, Seismic Isolator, Artificial Earthquake, Numerical Analysis

¹⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정
²⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정
³⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과, 석사과정
⁴⁾ 정희원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부, 부교수, 공학박사
(교신저자: nskim@pusan.ac.kr)
⁵⁾ 비회원 · (주)엔타이머세이프, 대표이사

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 10. 20 / 수정일 1차: 2010. 11. 26, 2차: 2010. 12. 7 / 게재확정일 : 2010. 12. 8)

1. 서론

미국의 노스리지 지진(1994), 일본의 고베지진(1995)등과 같이 최근에 발생한 대규모의 지진은 주요도시의 전력설비 및 통신장비에 대하여 수억 달러에 이르는 큰 피해를 일으켰다.^{(1),(2)} 그 외에도 지진 발생 후 전력공급의 중단과 통신장비의 파손으로 인하여 피해지역의 비상조치와 기능 복구에도 큰 지장을 초래할 수 있다. 지진발생중 대형통신

기기의 주요파손은 본체를 고정하는 정착장치의 파손과 과도한 정착으로 인하여 지진충격하중이 전달되어 발생하는 통신기기의 내부부품의 파손 등이 있다. 또한, 통신기기의 정착이 이루어지지 않았거나 불안정한 경우 장비의 전도가 발생할 수도 있다. 따라서 중요 통신장비의 하부에 지진격리장치를 적용하여 내진성능을 향상시키고, 지진으로부터 주요통신장비를 격리시켜 지진으로 인한 충격하중의 전달을 최소화하여 통신장비의 내부파손을 경감시킬 필요가 있다.

지진격리장치 중 Zayas et al.(1987)⁽³⁾, Mokha et al.(1990)⁽⁴⁾ 등에 의하여 제안되어진 FPS는 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. FPS는 건축구조물, 통신기기 및 전자장비 등을 지진으로부터 격리시키기 위하여 폭넓게 사용되어오고 있는 지진격리시스템으로서 국내에서는 장정범등(2008)⁽⁵⁾에 의하여 Shear Key와 Rubber Pad, Uplift Restrainer를 적용하여 상부구조물의 전도를 방지하고 최대절대변위를 감소시킬 수 있는 FPS를 개발하여 변압기에 적용하였으며, 황인호등(2008)⁽⁶⁾은 자력의 반발력을 이용해 재료의 성질을 대체하여 지진격리성능을 향상시킬 수 있는 자력을 이용한 FPS에 대한 연구를 진행하고 있다. 기존의 FPS는 진자의 특성을 이용하여 구조물을 지진으로부터 격리시키고 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있는 지진격리장치로서 마찰판의 곡률반경과 경사각, 마찰면의 마찰등을 설계하여 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있고, 이에 따라서 지진동에 의한 응답을 감소시킬 수 있는 장치이다. 하지만 현재까지 기록되었던 지진의 유효주기는 동일하지 않으며, 향후의 지진이 어떠한 특성을 가지고 발생할지는 미지수이다. 따라서 만약 지진의 유효주기가 FPS(Friction Pendulum System: 마찰진자베어링)의 진자특성에 의해 결정되어진 구조물의 고유주기와 일치하여 공진이 발생할 수도 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 원추형으로 설계된 마찰면의 기울기를 이용하여 지진에 의한 가속도응답과 절대변위응답을 조절할 수 있는 CFPBS(Cone-type Friction Pendulum Bearing System: 원추형 마찰진자베어링)를 개발하고 동적수치해석을 통하여 그 성능을 검증하는 것을 목표로 하고 있다. 또한, CFPBS의 제작 시 복잡한 계산과정을 생략하고 원하는 성능을 발휘할 수 있는 장치를 제작할 수 있도록 간단한 설계식을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

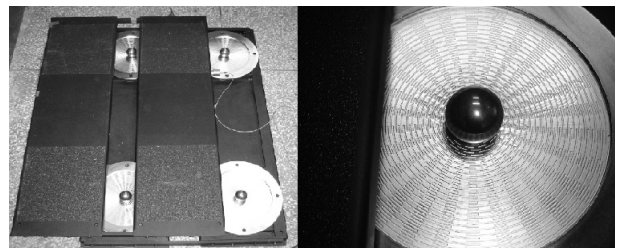
2.1 운동방정식으로부터 이론식 유도

지진발생시 지각은 수평방향과 수직방향으로 진동하며

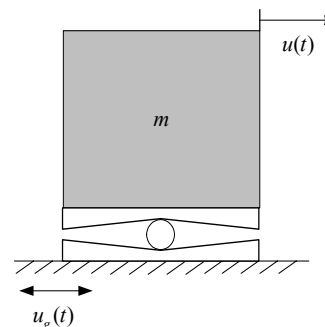
구조물의 피해를 강요한다. 따라서 양방향의 진동을 분석하여 내진성능을 평가하는 것은 매우 중요한 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 내진설계에서는 구조물이 수직하중으로 설계되므로 수직진동의 영향은 미비하며 건축구조설계기준(KBC-2005)등에서도 수평방향의 가속도성분을 이용하여 내진성능을 평가하고 있다. CFPBS의 경우 상부구조물의 하중효과로 인하여 지진으로부터 발생하는 연직가속도는 미미할 것으로 판단됨에 따라 수평방향의 가속도를 조사지표로 설정하고 이에 대한 감소효과를 평가하고자 하였으며 CFPBS의 내진성능을 평가하는 방법의 일환으로 운동방정식으로부터 이론식을 정립하고 이를 바탕으로 MATLAB7.0을 기반으로 하는 수치해석 프로그램을 제작하였다. 그림 1은 CFPBS로 구성된 내진장치와 CFPBS마찰면의 돌기를 나타낸 것이다. 그림 2는 지진하중작용 시의 CFPBS를 나타낸 것으로서 그림 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 지반가속도이다.

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

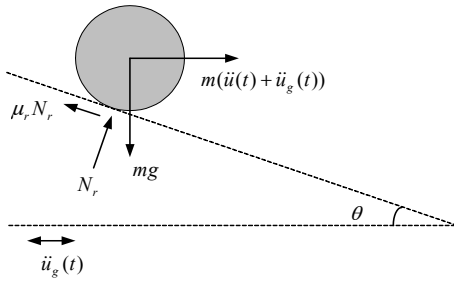
CFPBS의 경우 점성감쇠와 강성이 존재하지 않고 마찰력과 중력이 작용하기 때문에 그림 3과 같은 자유물체도를 그릴 수 있으며 그림 3으로부터 식 (2)의 운동방정식을 구할 수 있다. 식 (3)은 비탈면의 수직하중을 나타낸 것이다. 식 (2)



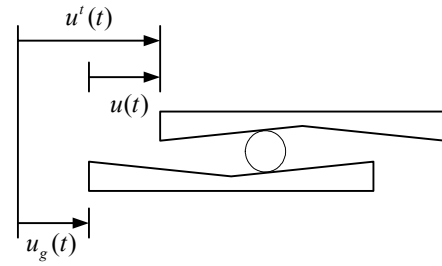
〈그림 1〉 CFPBS(Cone-type Friction Pendulum Bearing System) 내진장치



〈그림 2〉 CFPBS



〈그림 3〉 Free-body Diagram



〈그림 4〉 절대변위응답 추정

에 식 (3)을 대입하면 식 (4)를 유도할 수 있다. 식 (4)를 Δt 시간동안의 힘을 운동방정식으로 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 μ_r 은 구름마찰계수와 볼 반경의 비이다.

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

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

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

$$m\Delta u_{gi+1} + \mu_r mg \cos^2\theta \operatorname{sgn}(\dot{u}_i) - \mu_r m\Delta u_{gi+1} \sin\theta \cos\theta \operatorname{sgn}(u_i) \operatorname{sgn}(\dot{u}_i) + mg \cos\theta \sin\theta \operatorname{sgn}(u_i) - m \sin^2\theta \Delta u_{gi+1} = -m\Delta u_{gi+1} \quad (5)$$

Newmark- β Method에서 정의하는 상대변위, 상대속도, 상대가속도의 변화량은 식 (6)~(8)과 같다.

$$\Delta u_i = \frac{\Delta t^2}{6} \Delta \ddot{u}_i + \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i \quad (6)$$

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\Delta t}{2} \Delta \ddot{u}_i + (\Delta t) \ddot{u}_i \quad (7)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta u_i - \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i - 3\ddot{u}_i \quad (8)$$

베어링에 적재할 하중으로부터 질량(m)을 알 수 있으며, μ_r 은 임의의 값을 사용하였다. 초기 상대변위, 상대속도, 상대가속도가 0일 경우 지진하중($m\Delta u_{gi}$)을 이용하여 자유진동을 가하였을 경우 식 (8)로부터 상대가속도응답을 구하고 식 (7)로부터 상대속도응답 그리고 식 (6)으로부터 상대변위응답을 구한다. 식 (6)~(8)로 구한 가속도응답, 속도응답, 변위응답은 베어링의 하판과 상판의 상대 응답이다. 그러나 지진응답 해석을 위해서는 절대응답이 필요하다. 그러므로 그림 4와같이 표현된 CFPBS에서 확인할 수 있듯이 식 (9)~(11)을 이용하여 절대응답들을 구하였다. 여기서 $u^t(t)$ 는 절대변위응답, $\dot{u}^t(t)$ 는 절대속도응답, $\ddot{u}^t(t)$ 는 절대가속

도응답이다.

$$u^t(t) = u_g(t) + u(t) \quad (9)$$

$$\dot{u}^t(t) = \dot{u}_g(t) + \dot{u}(t) \quad (10)$$

$$\ddot{u}^t(t) = \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t) \quad (11)$$

중력과 지반가속도로 인한 상판이 수평으로 이동하는 가속도인 식 (12)보다 큰 하중이 발생하지 않을 경우 볼이 마찰에 의하여 구르지 않아 하판과 상판이 동일하게 움직임을 가지게 된다.

$$\mu_r mg \cos^2\theta - \mu_r m\ddot{u}_g(t) \sin\theta \cos\theta + mg \cos\theta \sin\theta - m \sin^2\theta \ddot{u}_g(t) \quad (12)$$

2.2 구름마찰계수의 정의

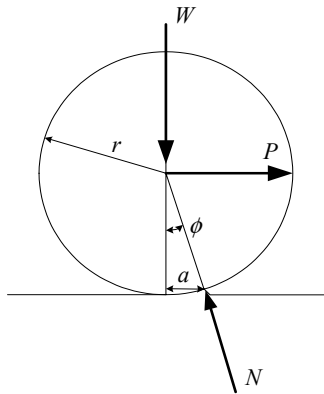
그림 5의 구름마찰계수(Coefficient of Rolling Resistance)는 식 (13)으로 정의될 수 있다.⁽⁷⁾ 여기서, W 는 휠의 하중(Load on Wheel)이며 P 는 일정속도를 유지하기위하여 가해지는 힘(Force Required for Constance Speed)을 나타낸다. 이들은 각각 식 (14), 식 (15)로 표현될 수 있다. μ_r (Friction Radius Ratio)은 구름마찰계수와 볼 반경의 비이므로 식 (16)으로 정리된다. 본 연구에서 사용된 CFPBS 실험체의 마찰면이 매끄럽지 아니한 관계로 정확한 P 를 산정하는 것은 난해한 문제다. 따라서 수치해석 시 임의의 μ_r 을 대입하여 계산된 고유진동수와 앞서 수행된 자유진동 실험으로부터 얻어진 고유진동수를 비교대조하여 상부질량의 변화에 따른 μ_r 을 정리하여 사용하였다.

$$a = \frac{Pr}{W} \quad (13)$$

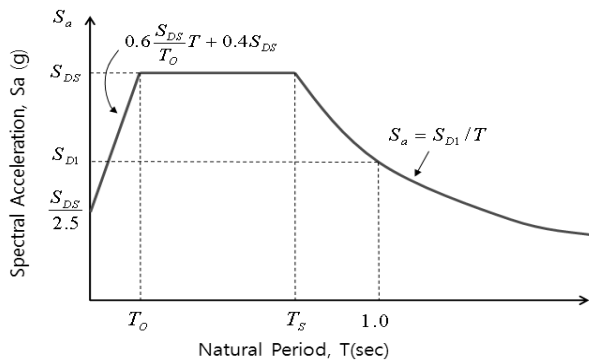
$$W = N \cos \phi \quad (14)$$

$$P = N \sin \phi \quad (15)$$

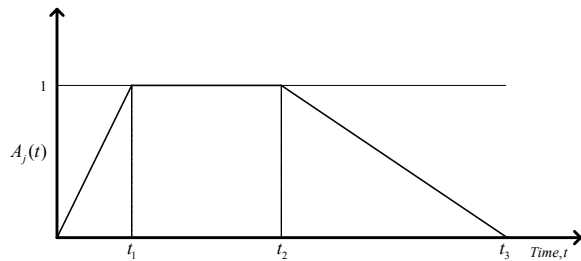
$$\mu_r = \frac{Pr}{W}/r = \frac{P}{W} \quad (16)$$



〈그림 5〉 Rolling Resistance Model



〈그림 6〉 설계스펙트럼가속도(KBC-2005)



〈그림 7〉 사다리꼴 포락함수ASCE Standard(1999)

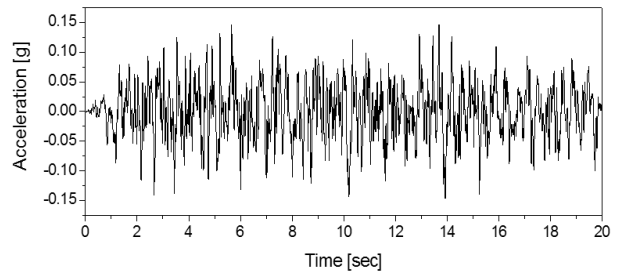
3. 인공지진파

3.1 인공지진파의 생성

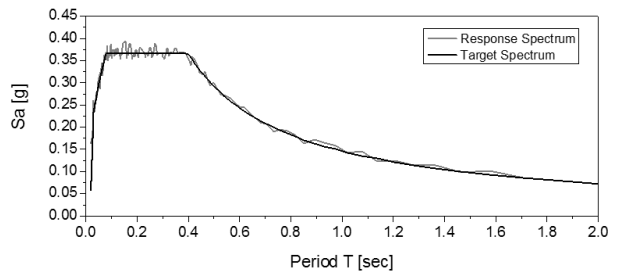
건축구조설계기준(KBC-2005)은 단자유도구조물에 대한 설계스펙트럼가속도를 작성하여 사용하고 있다. 그림 6은 건축구조설계기준(KBC-2005)에서 제시하고 있는 설계스펙트럼가속도이다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 제 1 지진지역의 보통암 기반에서의 설계스펙트럼가속도를 이용하여 7개의 인공지진파를 작성하였다. 인공지진파를 생성하기 위하여 그림 7과 같은 사다리꼴형태의 포락함수를 사용하였다. 이때 포락함수의 특성을 나타내는 계수값을 결정하기 위하여 ASCE Standard(1999)에서 제시된 표 1을 참조하여 최대지진규모

〈표 1〉 사다리꼴 포락함수를 가진 인공지진파의 계수(ASCE Standard, 1999)

지진의 규모	상승시간 (t ₁)	강진지속시간 (t ₂ -t ₁)	감쇠시간 (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



(a)



(b)

〈그림 8〉 인공지진파 : 설계스펙트럼 가속도, PGA=0.15g [보통암지반 (S_B), 지진지역(1지역)]

(7.0-7.5)의 값을 이용하였다.⁽⁹⁾ 그림 8은 제작된 인공지진파 중 하나의 가속도신호 및 응답가속도 스펙트럼과 설계스펙트럼을 비교한 것이다.

3.2 인공지진파의 검증

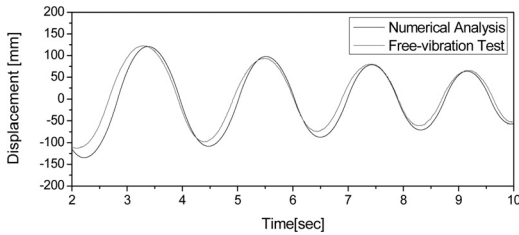
우리나라의 내진설계기준에 의하면, 수평2방향 지진입력을 동시에 작용시켜 지진응답해석을 수행할 경우, 식 (17)과 같이 두 입력지진의 상관계수 $|\rho_{ij}|$ 가 0.3이하가 되도록 정하고 있다. 이와 같은 기준은 내진설계가 가장 엄밀하게 수행되고 있다고 할 수 있는 원자력발전 시설물에도 적용되는 기준이다.⁽¹⁰⁾

$$|\rho_{ij}| = \left| \lim_{0 \leq \tau \leq T_0} \rho_{ij}(\tau) \right| < 0.3 \tag{17}$$

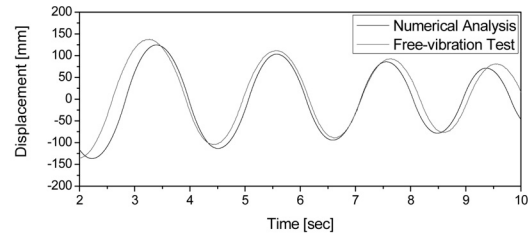
$$\rho_{ij}(\tau) = \frac{\sum_{m=1}^{N_i} (\ddot{x}_i(t_m) - \mu_i)(\ddot{x}_j(t_m - \tau) - \mu_j)}{\sqrt{\sum_{m=1}^{N_i} (\ddot{x}_i(t_m) - \mu_i)^2} \sqrt{\sum_{m=1}^{N_j} (\ddot{x}_j(t_m) - \mu_j)^2}} \tag{18}$$

〈표 2〉 인공지진파간의 상관계수(ρ_{ij})

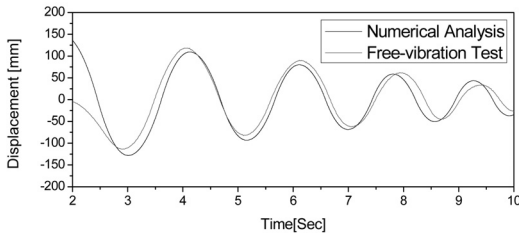
	1	2	3	4	5	6	7
1	1						
2	0.0326	1					
3	0.0585	0.0690	1				
4	0.0007	0.0000	0.0963	1			
5	0.0242	0.0220	0.0469	0.1246	1		
6	0.0157	0.0607	0.0123	0.0768	0.1719	1	
7	0.113	0.0177	0.0907	0.0353	0.0495	0.0850	1



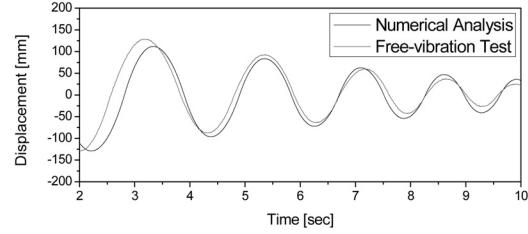
(a) Case2 : Mass=60kg, $\mu_r=0.0045$



(b) Case7 : Mass=360kg, $\mu_r=0.004$



(c) Case9 : Mass=480kg, $\mu_r=0.0065$



(d) Case11 : Mass=600kg, $\mu_r=0.006$

〈그림 9〉 자유진동실험 : CFPBS의 상부질량에 따른 μ_r 의 유추

인공지진과 $\ddot{x}_i(t)$ 와 $\ddot{x}_j(t)$ 사이의 상관계수 $\rho_{ij}(\tau)$ 는 두지진과 시계열이 가우스 확률분포를 따르므로 식 (18)과 같이 계산할 수 있다. 여기서 $t_m = m\Delta t$ 이며, μ_i 와 μ_j 는 각각 $\ddot{x}_i(t)$ 와 $\ddot{x}_j(t)$ 의 시간 축에 대한 평균으로 일반적으로 0이다.

표 2는 앞서 생성한 7개의 지진파에 대하여 상관관계를 조사한 것으로 생성된 인공지진파의 상관계수는 모두 0.3이하로 나타났다. 따라서 생성된 인공지진파 7개는 우리나라의 내진설계기준을 만족함을 알 수 있다.⁽⁹⁾

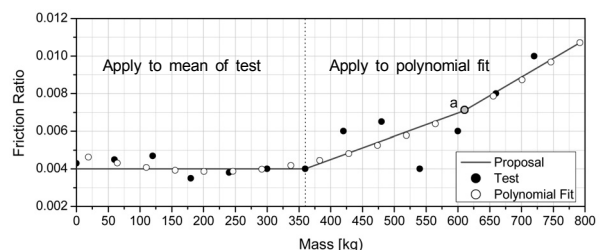
4. 수치해석 및 결과

4.1 MATLAB7.0기반의 수치해석프로그램을 이용한 매개변수연구

그림 9와 같이 수치해석 시 임의의 μ_r 을 대입하여 계산된 신호와 자유진동 실험으로부터 얻어진 신호를 비교대조하여 상부질량의 변화에 따른 μ_r 을 표 3과 같이 구하였다. 그리고 이를 도식화 하면 그림 10에서와 같이 350kg까지는 일정한 μ_r 의 값이 나타나며 일정수준이상의 하중이 가해질 경우 μ_r 이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. CFPBS의 원주

〈표 3〉 CFPBS의 상부 질량에 따른 μ_r

Case	Mass(kg)	μ_r
1	0	0.0043
2	60	0.0045
3	120	0.0047
4	180	0.0035
5	240	0.0038
6	300	0.0040
7	360	0.0040
8	420	0.0060
9	480	0.0065
10	540	0.0040
12	600	0.0060
11	660	0.0080
12	720	0.0100



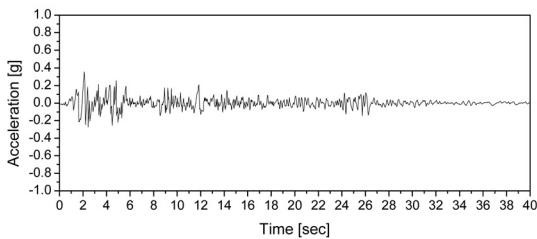
〈그림 10〉 CFPBS의 상부질량에 따른 μ_r 의 제안

형마찰면은 볼의 위치에 따라 가속도와 고유진동수가 변화하는 비선형특성을 가지고 있다. 원추형마찰면이 가지는 비선형성에 의하여 하중증가에 대한 μ_r 의 증가가 비선형적으로 나타나는 것으로 판단된다. 여기서 점 a는 변곡점으로 0.0071이다. 따라서 본 연구에서는 350kg까지의 μ_r 을 실험을 통하여 얻어진 값의 평균을 사용하였으며 그이상의 질량에 따른 μ_r 은 실험데이터로부터 도출된 다항식을 이용하여 μ_r 을 곡선으로 나타내어 사용하였다. CFPBS 실험체의 한쪽경사의 길이는 10cm이며 볼의 반경은 마찰진자베어링의 길이에 비해 미비하므로 배재하고 판단하였을 때, 절대변위가 20cm를 초과할 경우 마찰진자베어링으로서의 기능을 상실하게 된다. 따라서 허용절대변위는 20cm로 결정하였다.

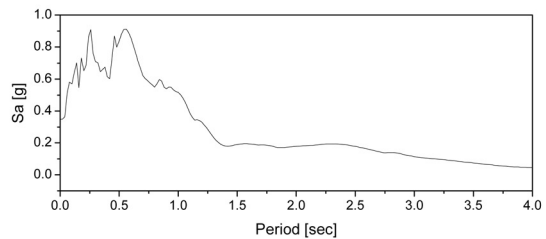
그림 11~13은 수치해석을 수행하기 위해 사용된 지진파들이다. El Centro NS (1940)와 Kobe NS(1995) 그리고 건축구조설계기준(KBC-2005)의 최대지진규모에 해당하는 인공지진파이며 인공지진파는 3장에서 생성한 인공지진파들을 사용하였다. CFPBS의 경사각과 마찰력을 매개변수로

하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 볼 구조물의 절대변위와 절대가속도에 대하여 정리하였다.

그림 14는 각각의 지진파를 이용하여 수치해석을 수행하였을 때의 볼 구조물의 최대절대가속도응답을 CFPBS의 μ_r 과 경사각 θ 의 변화에 따라서 정리한 것이며 그림 15는 동일한 상황에서의 최대절대변위를 나타낸 것이다. 서로 다른 입력지진파에 대하여 μ_r 과 θ 가 결정되면 CFPBS는 동일한 최대절대가속도응답이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. μ_r 이 낮을 경우에 선형 비례하여 증가하고 있으며 μ_r 이 커질수록 선형성이 약간 감소하지만 전체적인 선형성에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 그림 13을 통하여 알 수 있다. 그림 15는 기울기 및 μ_r 에 따른 CFPBS의 최대절대변위응답을 각 지진파에 대하여 정리한 것으로 그림 15(a), (b)는 지진파가 가지는 에너지가 큰 실제지진파의 경우이다. 이중 El Centro NS(1940)지진파의 경우 μ_r 이 낮을 경우 허용변위(Allowable Displacement)를 초과하지만 일정수준이상의 질량이 상판에 올려 질 경우 μ_r 이 증가하여 허용변위를 만

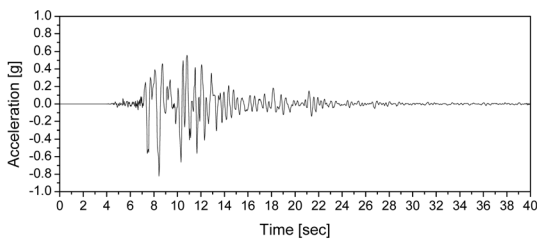


(a) 입력가속도신호, PGA=0.347g

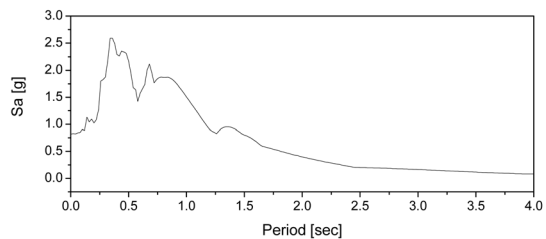


(b) Response Spectrum

〈그림 11〉 El Centro NS(1940)의 입력가속도신호와 Response Spectrum

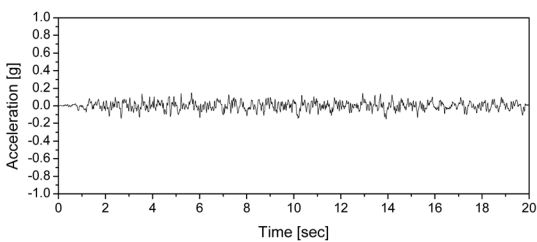


(a) 입력가속도신호, PGA=0.821g

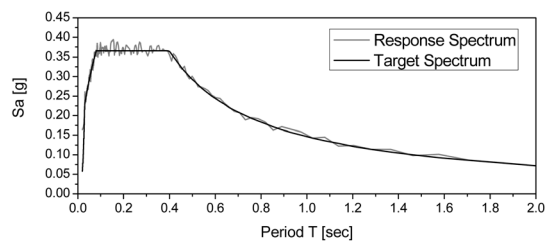


(b) Response Spectrum

〈그림 12〉 Kobe NS(1995)의 입력가속도신호와 Response Spectrum

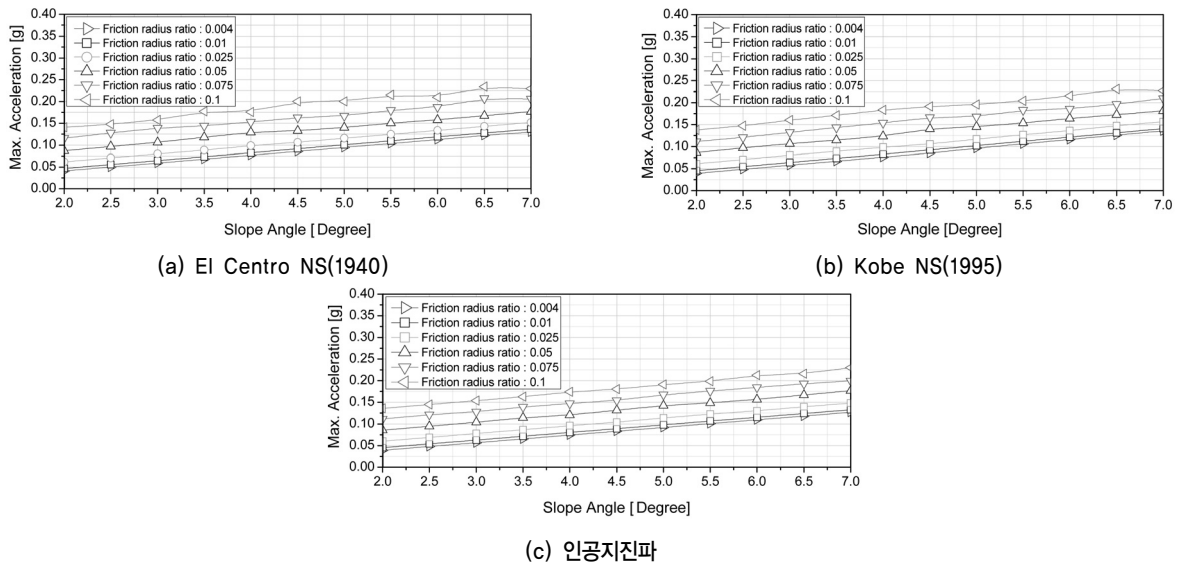


(a) 입력가속도신호, PGA=0.15g

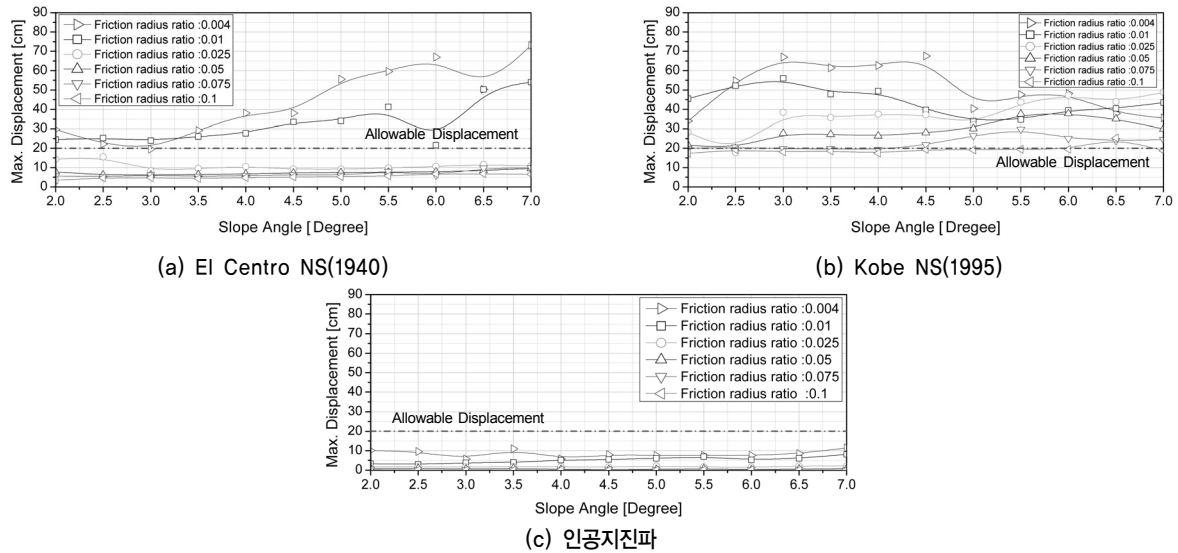


(b) Response Spectrum과 Target Spectrum

〈그림 13〉 인공지진파의 입력가속도신호, PGA=0.15g



〈그림 14〉 기울기와 μ_r 에 따른 CFPBS의 최대절대가속도응답

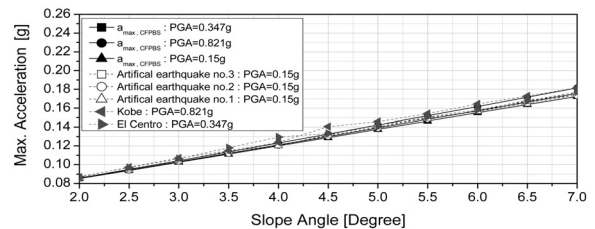


〈그림 15〉 기울기 및 μ_r 에 따른 CFPBS의 최대절대변위응답

족함을 보여준다. 하지만 지진파의 에너지가 가장 큰 Kobe NS(1995)지진파의 경우 대부분의 경우에 대하여 허용변위를 초과하고 있다. 그리고 에너지가 작은 인공지진파의 경우 그림 15(c)와 같이 모든 경우에 대하여 만족하고 있음을 알 수 있다.

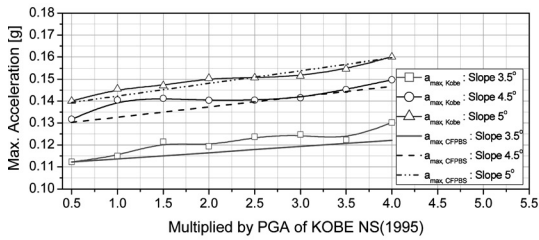
5. CFPBS설계식의 제안 및 검증

식 (19)는 CFPBS에서 상판의 최대응답가속도를 구하기 위하여 본 연구에서 제시하고자 하는 설계식이다.⁽¹⁰⁾ 앞서 행하여진 수치해석의 응답과 비교하기 위하여 PGA(Peak Ground Acceleration) $\ddot{u}_{g,max}$ 를 본 연구에서 제작한 인공지진파, El Centro NS(1940) 그리고 Kobe NS(1995)의 PGA

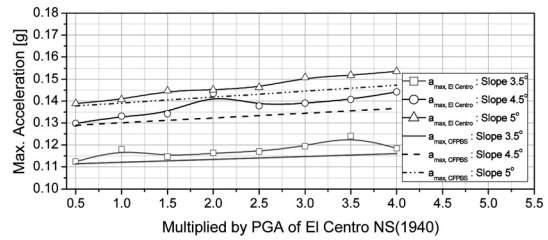


〈그림 16〉 설계식과 수치해석응답의 비교($\mu_r = 0.05$)

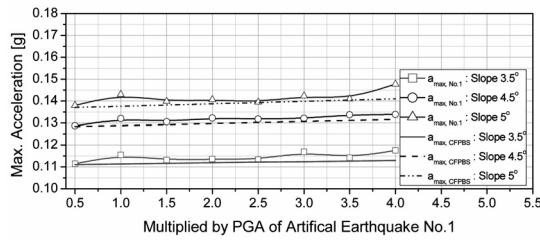
인 0.15g, 0.347g와 0.821g를 사용하였고 μ_r 은 상당히 큰 질량이 CFPBS상부에 올려진 것을 가정하여 임의로 0.05를 대입하였다. CFPBS의 기울기와 최대절대가속도응답의 관계를 도식화 하면 그림 16과 같이 식 (19)로부터 계산되어진 응답과 수치해석으로 구해진 응답이 상당히 유사함을 알



(a) Kobe NS(1995)



(b) El Centro NS(1940)



(c) 인공지진파 No.1

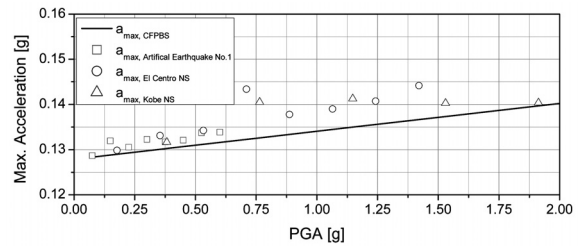
〈그림 17〉 지진파의 PGA증가에 따른 수식과 수치해석응답의 비교($\mu_r = 0.05$)

수 있다. 또한, PGA가 상승하여도 일정수준의 가속도레벨에서 수렴되어 그림 16의 모든 지진파에 대해서 μ_r 이 0.05 일 경우의 값과 유사함을 알 수 있다.

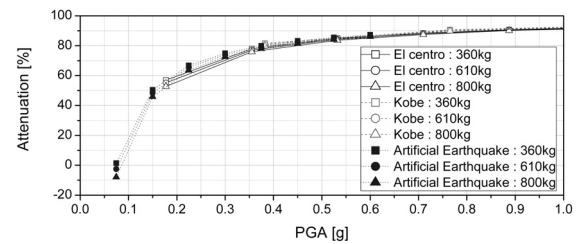
$$a_{\max, CFPBS} = \cos^2\theta(\mu_r + \tan\theta)(g + \ddot{u}_{g, \max} \tan\theta) \quad (19)$$

그림 17은 각지진파의 PGA를 0.5~4배까지 증폭하면서 CFPBS 볼 구조물의 최대절대가속도를 수치해석을 통하여 계산하였다. 여기서 μ_r 은 0.05로 고정하였다. 식 (19)는 단순히 지진파의 PGA만을 고려하며 지진파가 가지는 에너지를 고려하지 못하기 때문에 실제 지진파의 PGA를 배수단위로 증폭하여 수치해석을 수행함으로써 그 지진파가 가지는 에너지를 고려한 CFPBS의 최대절대가속도를 구하였다. 에너지량이 적은 인공지진파의 경우 수치해석의 결과와 수식의 결과가 상당히 일치하지만 PGA가 크고 상대적으로 큰 에너지를 가지고 있는 실제지진파의 경우 일정 값에서 수렴함을 알 수 있다. 그림 17의 응답을 배수가 아닌 PGA에 대하여 하나로 정리한 것이 그림 18이다. 지진파가 증폭됨에 따라 CFPBS의 최대절대가속도응답은 약 0.14g에서 수렴되며 이는 그림 14, 그림 16의 결과와 유사하다. 단, 경사각 θ 는 4.5° 이며 μ_r 은 0.05이다. 실제 지진파의 PGA는 1g미만인 경우가 대부분이므로, 식 (19)는 CFPBS의 설계식으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

CFPBS의 감소율 γ 는 식 (20)과 같이 PGA와 CFPBS의 최대절대가속도응답의 비로 정의하였다. 그림 19는 각 지진파에 대하여 θ 를 4° 로 고정하고 PGA를 증폭하였을 때의 감소율을 나타낸 것이다. 상부의 질량은 각각 360kg이하,



〈그림 18〉 증폭된 지진파의 PGA에 따른 대절대가속도응답($\mu_r = 0.05$, $\theta = 4.5^\circ$)



〈그림 19〉 수치해석응답으로부터 구한 PGA증가에 따른 감소율($\theta = 4^\circ$, $\mu_r = 0.004 \sim 0.011$)

610kg, 800kg일 경우로 가정하였으며 그림 10의 자유진동 실험으로부터 얻어진 해당 무게의 μ_r 값인 0.004, 0.007, 0.011를 사용하였다. 각각의 지진파에 대하여 CFPBS의 최대절대가속도응답을 수치해석으로부터 구한 후 식 (20)을 사용하여 감소율을 정리하였다. 동일한 성능을 가지는 CFPBS의 감소율은 지진파의 종류와 관계없이 μ_r 의 크기에 따라서 하나의 지수함수형태로서 나타남을 알 수 있다. 표 4~6은 μ_r 이 0.01이하일 경우의 감소율을 나타낸 것으로 μ_r 의 크기가 커질수록 CFPBS의 감소성능은 미세하게 감소하는 것을 알 수 있다.

〈표 4〉 PGA증가에 따른 CFPBS의 감소율($\mu_r = 0.004, \theta = 4^\circ$) : $0kg < m \leq 360kg$

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.07473	56.9	0.4105	0.07524	81.6	0.075	0.07390	1.4
0.347	0.07667	77.9	0.821	0.07621	90.7	0.15	0.07426	50.4
0.5205	0.07834	84.9	1.2315	0.07884	93.5	0.225	0.07472	66.7
0.694	0.08005	88.4	1.642	0.08059	95.0	0.3	0.07509	74.9
0.8675	0.07994	90.7	2.0525	0.08213	95.9	0.375	0.07538	79.8
1.041	0.08111	92.2	2.463	0.08390	96.5	0.45	0.07563	83.1
1.2145	0.08257	93.2	2.8735	0.08568	97.0	0.525	0.07620	85.4
1.388	0.08320	94.0	3.284	0.08741	97.3	0.6	0.07662	87.2

〈표 5〉 PGA증가에 따른 CFPBS의 감소율($\mu_r = 0.007, \theta = 4^\circ$) : $m = 610kg$

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.07770	55.2	0.4105	0.07836	80.9	0.075	0.07691	-2.5
0.347	0.07947	77.0	0.821	0.07993	90.2	0.15	0.07737	48.4
0.5205	0.08132	84.3	1.2315	0.08054	93.4	0.225	0.07769	65.4
0.694	0.08278	88.0	1.642	0.08329	94.9	0.3	0.07810	73.9
0.8675	0.08240	90.5	2.0525	0.04896	97.6	0.375	0.07830	79.1
1.041	0.08477	91.8	2.463	0.08685	96.4	0.45	0.07872	82.5
1.2145	0.08522	92.9	2.8735	0.08885	96.9	0.525	0.07930	84.8
1.388	0.08648	93.7	3.284	0.09051	97.2	0.6	0.07974	86.7

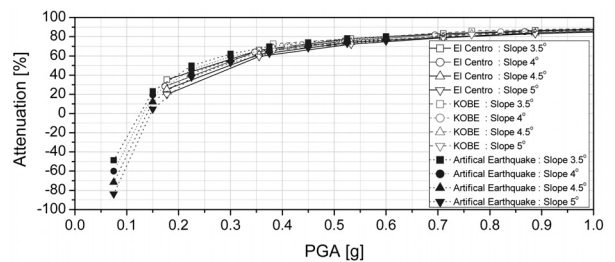
〈표 6〉 PGA증가에 따른 CFPBS의 감소율($\mu_r = 0.011, \theta = 4^\circ$) : $m = 800kg$

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.08203	52.7	0.4105	0.08253	79.8	0.075	0.08093	-7.9
0.347	0.08349	75.9	0.821	0.08336	89.8	0.15	0.08123	45.8
0.5205	0.08513	83.6	1.2315	0.08567	93.0	0.225	0.08183	63.6
0.694	0.08679	87.4	1.642	0.08606	94.7	0.3	0.08198	72.6
0.8675	0.08550	90.1	2.0525	0.08908	95.6	0.375	0.08231	78.0
1.041	0.08867	91.4	2.463	0.09036	96.3	0.45	0.08294	81.5
1.2145	0.08898	92.6	2.8735	0.09152	96.8	0.525	0.08309	84.1
1.388	0.09164	93.3	3.284	0.09522	97.1	0.6	0.08378	86.0

$$\gamma = \left(1 - \frac{a_{\max, CFPBS}}{u_{g, \max}} \right) \times 100 \quad (20)$$

그림 20과 표 7~10은 μ_r 의 값을 0.05로 고정하고 θ 를 매 개변수로 하여 각각의 증폭된 지진파에 대하여 CFPBS의 감소율을 수치해석으로부터 계산한 것이다. μ_r 의 값이 클 경우 낮은 PGA에서의 감소율은 상당히 저조하게 나타나고 있다.

그림 16, 19 및 20으로 부터 θ 가 낮아지거나 μ_r 이 작아지면 최대절대가속도가 감소하는 것을 확인 하였다. 최대절



〈그림 20〉 수치해석응답으로부터 구한 PGA증가에 따른 감소율 ($\theta = 3.5^\circ \sim 4.5^\circ, \mu_r = 0.05$)

대변위는 μ_r 이 클 경우 줄어들며 θ 의 영향은 크지 않다. 본

〈표 7〉 상당히 큰 하중에 대한 PGA증가에 따른 감소율($\mu_r = 0.05, \theta = 3.5^\circ$)

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.11239	35.2	0.4105	0.11229	72.6	0.075	0.11142	-48.5
0.347	0.11805	65.9	0.821	0.11489	86.0	0.15	0.11545	23.0
0.5205	0.11467	77.9	1.2315	0.12149	90.1	0.225	0.11314	49.7
0.694	0.1163	83.2	1.642	0.11939	92.7	0.3	0.11364	62.1
0.8675	0.11696	86.5	2.0525	0.12374	93.9	0.375	0.11335	69.7
1.041	0.11937	88.5	2.463	0.12477	94.9	0.45	0.11691	74.0
1.2145	0.12402	89.7	2.8735	0.12232	95.7	0.525	0.11415	78.2
1.388	0.11852	91.4	3.284	0.13015	96.0	0.6	0.11753	80.4

〈표 8〉 상당히 큰 하중에 대한 PGA증가에 따른 감소율($\mu_r = 0.05, \theta = 4^\circ$)

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.12454	28.2	0.4105	0.12159	70.3	0.075	0.12008	-60.1
0.347	0.12511	63.9	0.821	0.12358	84.9	0.15	0.12134	19.1
0.5205	0.12600	75.7	1.2315	0.13005	89.4	0.225	0.12258	45.5
0.694	0.12614	81.8	1.642	0.12979	92.0	0.3	0.12199	59.3
0.8675	0.12730	85.3	2.0525	0.12936	93.6	0.375	0.12445	66.8
1.041	0.12885	87.6	2.463	0.13028	94.7	0.45	0.12319	72.6
1.2145	0.13697	88.7	2.8735	0.13231	95.3	0.525	0.12251	76.6
1.388	0.12922	90.6	3.284	0.13396	95.9	0.6	0.12533	79.1

〈표 9〉 상당히 큰 하중에 대한 PGA증가에 따른 감소율($\mu_r = 0.05, \theta = 4.5^\circ$)

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.12987	25.1	0.4105	0.13168	67.9	0.075	0.1287	-71.6
0.347	0.13313	61.6	0.821	0.14054	82.8	0.15	0.13195	12.0
0.5205	0.13423	74.2	1.2315	0.14127	88.5	0.225	0.13057	41.9
0.694	0.14338	79.3	1.642	0.1403	91.4	0.3	0.13226	55.9
0.8675	0.13778	84.1	2.0525	0.14038	93.1	0.375	0.13171	64.8
1.041	0.13899	86.6	2.463	0.14151	94.2	0.45	0.13211	70.6
1.2145	0.14074	88.4	2.8735	0.14533	94.9	0.525	0.1337	74.5
1.388	0.14417	89.6	3.284	0.14971	95.4	0.6	0.13385	77.6

〈표 10〉 상당히 큰 하중에 대한 PGA증가에 따른 감소율($\mu_r = 0.05, \theta = 5^\circ$)

El Centro NS(1940)			Kobe NS(1995)			인공지진파 No.1		
PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]	PGA[g]	응답가속도[g]	감소율[%]
0.1735	0.13888	19.9	0.4105	0.14001	65.8	0.075	0.13795	-83.9
0.347	0.14074	59.4	0.821	0.14561	82.2	0.15	0.14301	4.6
0.5205	0.1447	72.1	1.2315	0.14712	88.0	0.225	0.13984	37.8
0.694	0.14515	79.0	1.642	0.15046	90.8	0.3	0.14058	53.1
0.8675	0.14622	83.1	2.0525	0.1506	92.6	0.375	0.13952	62.7
1.041	0.15076	85.5	2.463	0.15147	93.8	0.45	0.14231	68.3
1.2145	0.1518	87.5	2.8735	0.15469	94.6	0.525	0.14101	73.1
1.388	0.15353	88.9	3.284	0.16004	95.1	0.6	0.14773	75.3

연구에서 사용된 CFPBS는 μ_r 이 0.01일 경우 입력지진파에 대하여 최대가속도응답이 약 0.075g에서 수렴하는 값을 가지도록 설계되어있음을 그림 14에서 알 수 있다. 국내 건축물의 내진설계기준은 0.165g이며 건축구조설계기준(KBC-2005)을 만족하는 인공지진파의 PGA는 약 0.15g이다. 따라서 본 연구에서 사용된 CFPBS의 최대절대가속도응답이 0.075g에서 수렴하는 것은 건축구조설계기준(KBC-2005)을 만족하는 인공지진파의 PGA에 대하여 표 6에서와 같이 감소율이 약 45%정도가 되는 것을 의미한다. 따라서 국내 건축물 내진설계에 사용되는 기준에 대하여 만족할만한 감소율을 가지는 것을 알 수 있으며, 입력지진파의 PGA가 클수록 CFPBS의 감쇠성능은 더욱 좋아지는 것을 그림 19 및 20을 통하여 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 CFPBS의 내진성능검증 및 그 성능을 결정할 수 있는 설계식의 제안에 주안점을 두었다. 실제 CFPBS를 이용하여 상부의 질량을 매개변수로 두고 자유진동실험을 수행하였다. Newmark- β Method를 이용하여 MATLAB7.0기반의 수치해석 프로그램을 작성하였으며 자유진동실험으로부터 얻어진 CFPBS의 동특성을 바탕으로 수치해석을 수행하였다.

자유진동실험으로부터 상부질량에 따른 μ_r 을 유추하였다. 수치해석의 결과로부터 μ_r 과 θ 가 결정되면 CFPBS는 서로 다른 입력지진파에 대하여 동일한 최대절대가속도응답이 나타나며 θ 가 낮아지거나 μ_r 이 작아지면 최대절대가속도가 감소하는 것을 확인하였다. μ_r 이 낮을 경우 절대변위응답이 커지는 경향이 있다. 따라서 대상으로 하고자 하는 지진파에 따라 CFPBS의 지름을 결정할 필요가 있다.

CFPBS에서 상판의 최대가속도응답을 구하기 위한 설계식을 제시하였으며, 설계식으로부터 계산되어진 응답과 수치해석의 응답을 비교하여 설계식이 타당함을 증명하였다. μ_r 의 크기가 커질수록 CFPBS의 감쇠성능은 조금씩 감소하지만 μ_r 이 0.01이하일 경우는 최대절대가속도응답의 변화폭이 작다. 동일한 성능을 가지는 CFPBS의 감소율은 지진파의 종류와 관계없이 μ_r 의 크기에 따라서 하나의 지수함수 형태로서 나타남을 알 수 있다. 실험에 쓰인 CFPBS의 θ 는 4°로 800kg이하의 물체에 대하여 건축구조설계기준(KBC-2005)을 만족하는 인공지진파의 PGA(약 0.15g)에 대해 45%이상의 감소율을 가지고 있다. 지진파의 PGA가 클수록 CFPBS의 감쇠성능은 우수해진다.

이 연구의 결과는 이론적 수식전개와 수치해석에 의한 결과이며, 수평방향의 가속도성분을 조사지표로 하여 정리하였다. 따라서 차후 진동대를 이용한 지진모사실험을 실시하여 수치해석결과와 비교분석할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 보다 진보된 지진격리시스템을 구성하기 위하여 수평방향의 내진성능뿐만 아니라 수직방향의 내진성능 역시 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 또한 실험체 제작 및 설치에 도움을 주신 김준성대표와 전동만이사께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Murota, N., Feng, M. Q., and Liu, G. Y., "Experimental and Analytical Studies of Base Isolation System for Seismic Protection of Power Transformers," *Tectical Report MCEER-05-0008*, MCEER, 2005.
2. (사)일본전기협회, 변전소 등에 있어서 전기설비의 내진설계 지침, JEAG 5003, 1999.
3. 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, 98, 1987.
4. Mokha, A., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., "Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of Sliding Isolation System with a Spherical Surface", Report No. NECER-90-0020, Natl. ctr. for Earthquake Engrg. res, State Univ. of New York, Bufflo, NY, 1990.
5. 장정범, 김정기, 황경민, 함경원, 박진완, 이찬욱, "변압기의 내진성능 향상을 위한 마찰진자 면진장치의 시험 연구," 한국지진공학회 논문집, 제12권, 제2호, 1-8, 2008.
6. 황인호, 신호재, 이종세, "자력을 이용한 마찰진자 베어링의 면진성능," 한국지진공학회 논문집, 제12권, 제4호, 55-66, 2008.
7. Shames, Irving Herman, *Engineering Mechanics : Statics and Dynamics* : 4th edition, Prentice Hall. 1997.
8. 대한건축학회, (건설교통부고시)건축구조설계기준, 기문당, 2005.
9. 부산대학교 생산기술연구소, 지진격리교량의 시간이력해석을 위한 인공지진파 작성 연구, 부산대학교 생산기술연구소, 2004.
10. ASCE standard, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, 1999.
11. Tasi, M. H. Wu, S. Y. Chang, K. C. Lee, G. C., "Shaking table test of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 5, 694-702, 2007.