

FPS로 면진된 원전 주제어실의 내진 성능 평가

Seismic Performance Evaluation for MCR of Nuclear Power Plant Isolated by FPS

김대곤¹ 김우범² 서용표³ 문대식⁴ 김종엽⁴

Kim, Dae-Kon Kim, Woo-Byum Suh, Youg-Pyo Moon, Dea-Sik Kim, Jong-Yup

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the seismic performance for a seismically isolated main control room (MCR) of nuclear power plant. MCR was isolated by spherically shaped friction pendulum system (FPS). The FPS provided the simplest means of achieving long period in the isolation system under low gravity load. Some parametric studies were conducted with different properties of FPS. When the coefficient of friction in the sliding surface of FPS is low, the seismic performance of MCR was satisfactory. However, the lateral displacement in the isolation level was rather large. To restrict this displacement into adequate range, a fluid viscous dampers were used.

1. 서론

Friction Pendulum System (FPS)는 지진피해로부터 건물, 교량, 그리고 상업시설물과 같은 구조물을 보호하기 위하여 사용되는 지진격리 장치이다. FPS는 미국의 Earthquake Protection System (EPS)에서 1985년 개발하였으며 미국 샌프란시스코에 있는 역사적 가치가 있는 U. S. Court of Apples 건물의 내진보강, benicia-Martinez 교량의 내진보강, 그리고 영국에 있는 액화천연가스탱크의 면진 등 많은 구조물에 널리 사용되어져 오고 있다. 이들은 면진된 구조물이 강한 지진하중을 피할 수 있도록 진자의 특성을 이용하여 면진된 구조물의 주기를 길게 만든다. 다른 지진격리 장치들과 마찬가지로 지진에 의해서 야기된 변위는 주로 FPS에서 발생하며 구조물로 전달되는 횡력이나 진동은 크게 감소한다. 한편 지진하중의 크기가 작을 때에는 진자운동이 발생치 않고 일반적인 구조물처럼 거동한다. FPS의 지진격리장치로서의 신뢰도나 거동의 일관성은 미국 뉴욕주립대학교(버팔로)⁽¹⁾와 캘리포니아 주립대학(버클리)⁽²⁾에서 행한 많은 실험으로부터 확인되었다.

1) 정희원 · 서울산업대학교 구조공학과, 조교수

2) 정희원 · 공주대학교 건축공학과, 부교수

3) 전력 연구원, 책임 연구원

4) 서울산업대학교 구조공학과, 석사과정

본 논문에서는 국가적으로 중요한 시설물인 국내 원전 주제어실의 내진성능 향상을 위하여 지진격리장치인 FPS를 선정하였다. 대상 주제어실의 효율적 지진응답 저감을 위해 사용될 FPS의 최적의 기하학적, 재료적 특성치들을 해석적으로 parametric study를 수행하여 결정하였다. 또한 과도한 면진 층에서의 횡변위를 적절한 수준으로 구속하기 위하여 점성 감쇠기를 사용하였다. 점성 감쇠기로부터 얻어야 하는 필요한 감쇠량도 parametric study를 통하여 구하였다. 본 연구의 목적은 향후 계획된 원전 축소 주제어실 진동대 실험 시험체의 면진에 사용될 FPS와 점성 감쇠기의 제작을 위한 해석적 연구이다.

2. 지진 격리 장치의 구조적 특성⁽¹⁾

2.1 FPS

그림 1은 전형적인 FPS의 단면형상을 보여 준다. FPS는 고강도 강으로 만들어 졌으며 articulated slider와 stainless steel concave surface의 미끄럼 면은 수직방향으로 강하며 (high bearing capacity) self lubricating의 PTFE-based 복합재료로 이루어져 있다. 이 복합재료는 항공·우주분야에서 40년 이상 사용되어져 오고 있으며 마찰 계수가 작고 내마모성이 좋으며, 심한 온도 변화에도 마찰특성의 변화가 거의 없다. 지진과 같은 빠른 속도에서는 3%~12%의 동적마찰에 의해 저항하고 온도변화(열팽창)와 같은 느린 속도에서는 2%~4%의 동적 마찰에 의해 저항한다. 대변위시 displacement stopper는 FPS의 수직하중 지지능력의 상실을 막아 주는 중요한 안전기능을 담당한다. FPS 위에 있는 구조물의 거동은 진자운동과 동일하며, 여기에 부가적으로 미끄럼 면에서의 유용한 마찰효과를 보유하고 있다. FPS에 변위를 유발하는 힘은 구형 표면을 따라 구조물이 올라가는 동안 발생하는 복원력과 미끄럼 면에서의 마찰력의 조합으로 이루어진다.

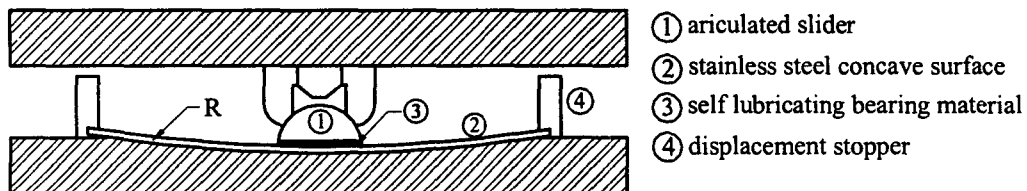


그림 1 전형적인 FPS 단면형상

FPS의 힘-변위($F-u$) 관계의 유도는 그림 2로부터 수직, 수평방향에서의 힘의 평형조건을 고려하여 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$F = \frac{W}{R \cos \theta} u + \frac{\mu W}{\cos \theta} \quad (1)$$

여기서 W =FPS에 가해진 무게, R =곡률반경, 그리고 μ =마찰면의 마찰계수이다. 한편 곡률 반경이 R 인 FPS의 수평변위 수용 범위는 보통 R 의 20% 이하이므로 이 경우 θ 는 작은 값이므로 식(1)에서 $\cos \theta \approx 1$ 이다. 따라서 식(1)은 식(2)과 같이 간략화 할 수 있으며 실무적

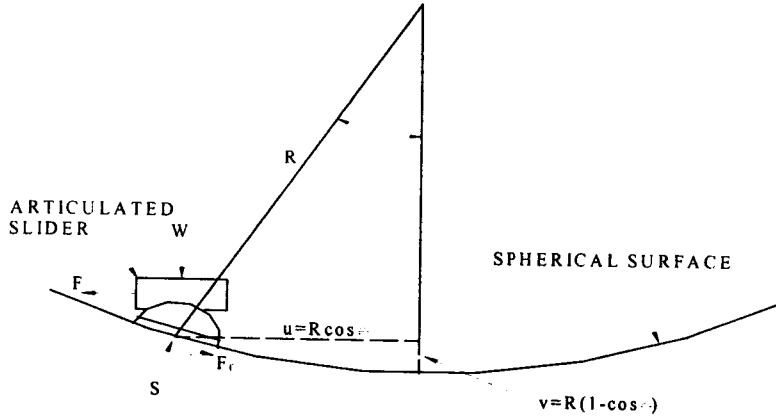


그림 2 FPS의 자유 물체도

으로 대부분의 경우에 적용되어 질 수 있다.

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (2)$$

식(2)에서 $\frac{W}{R}u$ 항은 진자운동을 안정시키는 복원력을 나타내며 지진발생 후 FPS를 원위치로 돌아오게 하는 힘이다. 한편 $\mu W \operatorname{sgn}(\dot{u})$ 항은 미끄럼 동안의 마찰력의 기여도를 나타낸다. 따라서 복원력에 대한 FPS의 강성 K 는 식(1)의 첫 번째 항으로부터 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{W}{R} \quad (3)$$

결과적으로 FPS 위의 구조물이 완전 강체 상태 (rigid body condition)라 가정하면 FPS에 의해 지진 격리된 구조물의 주기는 식(3)의 관계로부터 식(4)으로 구할 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{KG}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (4)$$

식(4)에서 주기는 구조물의 질량에는 관계가 없고, 단지 FPS의 구면곡률반경 R 에만 관계가 있으므로 구조물의 주기를 이동하고 싶으면 곡률반경을 조절함으로써 가능하다. 또한 식(3)에서 강성 K 는 구조물의 무게에 직접적으로 비례함을 보여 주고 있기 때문에 FPS의 강성 중심이 구조물의 질량중심과 자동적으로 일치되기 때문에 지진 발생시 구조물의 비틀림 현상은 최소화 될 수 있다.

한편 식(2)에서 마찰계수 μ 는 마찰면의 조도와 변위 변화량(속도)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) \exp(-a|\dot{u}|) \quad (5)$$

여기서 f_{\max} , f_{\min} =FPS의 속도가 빠를 때와 느릴 때의 마찰계수이고 a =속도에 따른 마찰계수의 변화를 조절하는 상수이다.

2.2 점성 감쇠기⁽³⁾

점성 감쇠기는 실린더 구멍(orifices)을 통과하는 점성재료(silicon oil)에 의해 지진에너지를 소산시키는 장치이며, 그림 3에 그 전형적인 모습을 보여준다. 감쇠력은 Piston Head의 이동에 따라서 생기는 각 chamber의 압력 차이에 의해서 생긴다. 즉 압축력에 의해 Piston Head가 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이면 실린더 안의 Silicon oil은 Chamber 2에서 Chamber 1로 움직인다. 따라서 각 chamber의 압력차에 비례하는 감쇠력(F_d)이 발생되며 식(6)으로 감쇠력을 구할 수 있다.

$$F_d = C_d \text{sign}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (6)$$

여기서, C_d =감쇠상수, \dot{u} =속도, 그리고 α =감쇠지수이며 일반적으로 0.4~2.0의 범위에 있다.

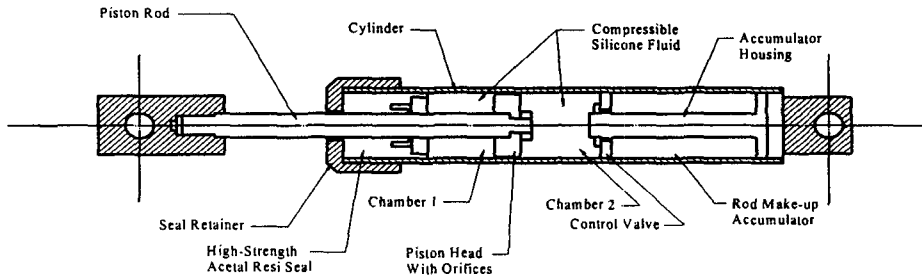
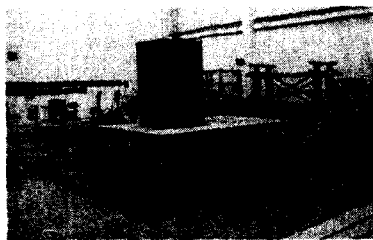


그림 3 전형적인 점성 감쇠기 단면 형상

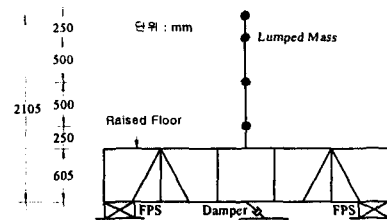
3. FPS로 변진된 구조물의 해석

지진감시 시스템 제어 캐비닛의 지진동 저감을 위해 사용될 FPS와 점성 감쇠기의 설계를 위하여 인공지진파를 이용하여 비탄성 시간이력해석을 수행하였다. 그림 4(a)는 옮긴 원자력 1, 2호기에 설치될 지진감시시스템 제어 캐비닛을 보여주며 그림 4(b)는 해석모형을 보여준다. 해석에 사용한 지반 가속도는 그림 5(a)에서 보여주는 인공 지진파를 사용하였다.

그림 5(b)은 감쇠 $\xi=5\%$ 일 때 사용인공지진파에 대한 Spectral 변위(S_d)와 가속도(S_a)를 한꺼번에 보여주며 그림 4(b)에서 Raised Floor가 FPS로 변진되기 전(기초고정)의 구조물의 주기는 해석을 통하여 0.094초를 얻었다. 따라서 구조물의 주기를 길게 하여 적절한 S_d 에서

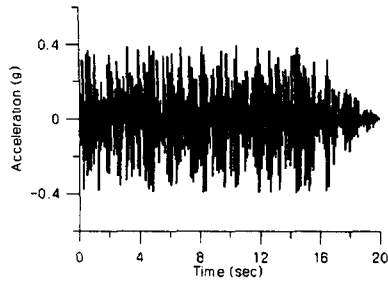


(a) 제어 캐비닛

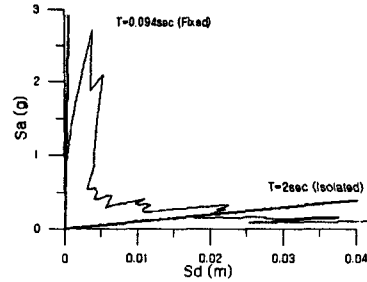


(b) 해석 모델

그림 4 제어 캐비닛 및 해석 모델



(a) 인공 지진파



(b) Sa-Sd

그림 5 사용 지진파 및 Response Spectrum

S_a 를 상당히 감소시키기 위해 목표주기를 2초로 정하였다. 따라서 식(4)로부터 FPS의 곡률 반경 $R=994$ mm가 되어야 한다. 한편 식(5)의 관계가 있는 FPS의 미끄럼면의 마찰계수 μ 는 3가지 경우; 즉 Low Friction ($f_{min}=0.03$, $f_{max}=0.05$), Medium Friction ($f_{min}=0.055$, $f_{max}=0.125$), 그리고 High Friction ($f_{min}=0.08$, $f_{max}=0.20$)을 채택하였으며 상수 a 는 0.015 sec/mm를 채택하였다.

한편 FPS 한 개당 가해지는 중력 W 가 FPS의 이력거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 3가지 경우; 즉 190 kgf, 600 kgf, 1000 kgf를 택하였다. 표 1은 Parametric Study를 위한 총 9가지 경우의 해석 모델의 변수를 보여준다.

표 1 해석 모델별 변수

CASE	주기(sec)	R(mm)	W(kgf)	f_{min}	f_{max}
1	2.0	994	190	0.03	0.05
2				0.055	0.125
3				0.08	0.20
4			600	0.03	0.05
5				0.055	0.125
6				0.08	0.20
7			1000	0.03	0.05
8				0.055	0.125
9				0.08	0.20

4. 해석 결과

그림 6은 마찰계수 값이 Medium Friction인 경우 FPS 한 개당 가해지는 중력 W 의 크기가 FPS의 이력거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 case-2, case 5, 그리고 case 8에 대하여 행한 해석결과의 이력곡선을 보여준다. 중력 W 가 클수록 식(3)으로부터 FPS의 강성 K 도 커짐을 관찰할 수 있고, 또한 동일변위 u 와 동일 마찰계수 μ 에 대하여 식(2)로부터 FPS의 횡력 F 도 커짐을 관찰할 수 있다.

그림 7은 FPS 한 개당 가해진 중력 $W=1000$ kgf 인 경우 마찰계수 μ 의 변화가 FPS의

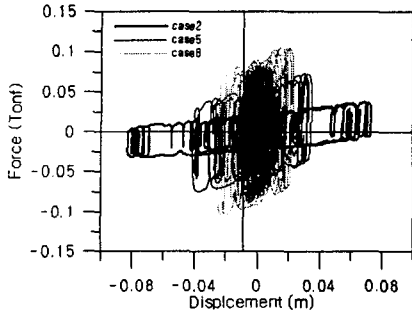


그림 6 중력에 따른 이력곡선

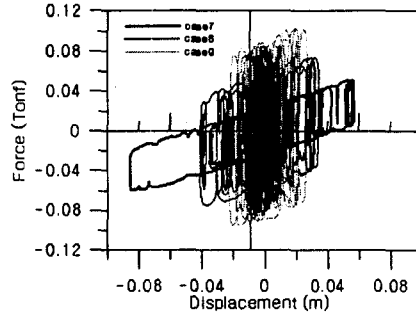
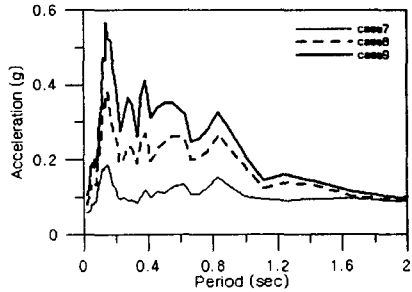


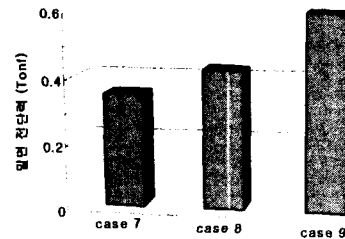
그림 7 마찰계수에 따른 이력곡선

이력거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 μ 의 값이 Low, Medium, 그리고 High인 case 7, case 8, 그리고 case 9의 이력거동곡선을 보여준다. 중력 W 가 모두 동일하므로 식(3)으로부터 FPS의 강성 K 도 동일함을 관찰할 수 있고 또한 동일변위 u 와 동일 중력 W 에 대하여 식(2)로부터 마찰계수 μ 가 증가할수록 마찰력의 기여도 때문에 FPS의 횡력 F 도 커짐을 관찰할 수 있다. 이상의 해석 결과로부터 FPS가 적절히 모델링 되었음을 확인하였다.

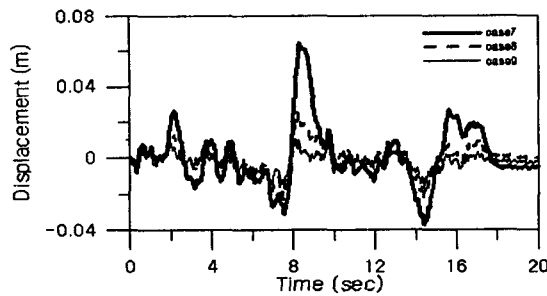
한편 향후 계획된 원전 축소 주제어실 진동대 실험을 위한 시험체로부터 FPS 한 개당 1000 kgf가 가해지도록 할 예정이므로 $W=1000$ kgf 인 경우 사용 인공지진파에 대한 최적의 마찰계수 값을 정하기 위해 case 7, case 8, 그리고 case 9의 경우 그림 8(a), 8(b), 그리고 8(c)은 그림 4(b)에서 캐비닛과 Raised Floor가 만나는 부분에서의 Floor Response Spectrum (FRS), 밀면전단력, 그리고 면진장치의 변위 시간이력을 각각 보여준다.



(a) FRS



(b) 밀면 전단력

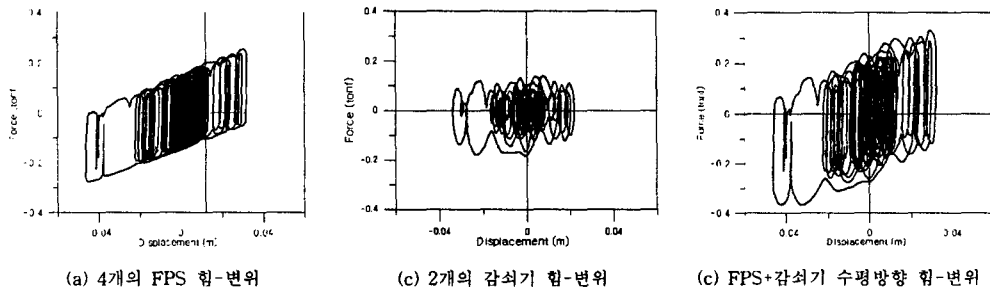


(c) 면진 장치의 변위

그림 8 마찰계수에 따른 구조성능

그림 8(a)과 그림 8(b)에서 마찰계수 값이 Low Friction (case 7)일 때의 구조성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 그러나 그림 8(c)에서 보여 주듯이 면진 층의 변위는 가장 크다.

이 변위를 줄이기 위해서 그림 3과 같은 점성 감쇠기를 case 7에 그림 4(b)와 같이 45°로 2개 장착하였다. 식(6)에서 감쇠상수 $C_d=0.7 \text{ tonf/m}$ 과 감쇠지수 $\alpha=1.0$ 을 채택하였다. 그림 9(a), 9(b), 그리고 9(c)는 FPS의 힘-변위곡선(4개의 FPS의 합), 감쇠기의 축방향 힘-변위곡선(2개의 감쇠기의 합), 그리고 4개의 FPS+2개의 감쇠기 수평방향 힘을 각각 보여준다.



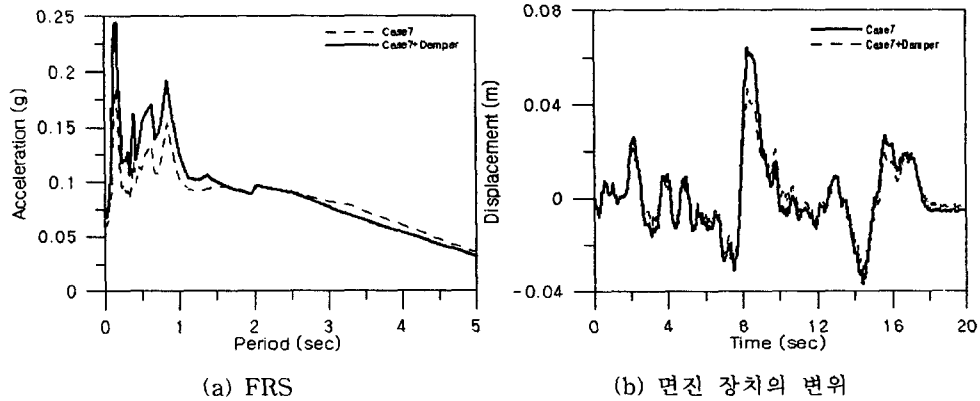
(a) 4개의 FPS 힘-변위

(b) 2개의 감쇠기 힘-변위

(c) FPS+감쇠기 수평방향 힘-변위

그림 9 힘-변위 이력곡선

그림 10(a)과 10(b)은 case 7과 case 7에 감쇠기를 장착한 경우의 FRS와 면진 층의 수평 변위를 각각 보여준다. case 7에 감쇠기를 장착한 경우 FRS는 주기가 2초 이상일 때 case 7과 거의 동일하거나 작고 특히 면진 층의 수평변위는 줄어들음을 관찰할 수 있다.

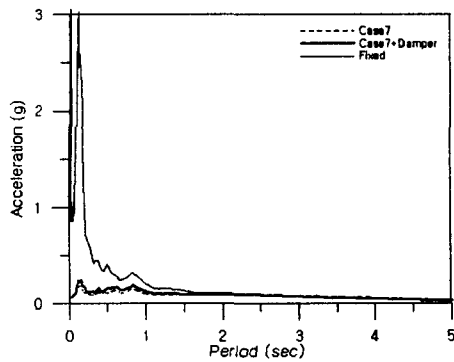


(a) FRS

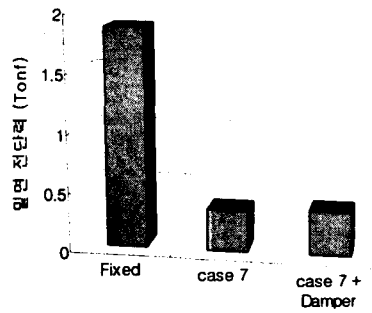
(b) 면진 장치의 변위

그림 10 감쇠기 효과

최종적으로 면진되기 전(기초고정), FPS만을 사용한 경우, 그리고 FPS+ 감쇠기의 경우 구조성능을 그림 11에 나타내었다. 구조물이 면진되기 전에 비해 FPS로 면진시키거나 감쇠기 까지 사용한 경우 층가속도 (Floor Acceleration), 밀면 전단력 등 구조성능이 월등히 좋아 짐을 관찰할 수 있다.



(a) FRS



(b) 밀면 전단력

그림 11 면진 전·후의 구조성능

결론

향후 계획된 원전 축소 주제어실 진동대 실험 시험체의 면진(목표주기=2초, 즉 $R=994$ mm)에 사용될 지진격리장치 FPS와 점성 감쇠기의 제작을 위하여 FPS의 미끄럼면의 마찰계수, FPS한 개당 가해지는 중력의 크기, 그리고 점성 감쇠기의 감쇠상수 및 감쇠 지수를 해석변수로 채택하여 Parametric Study를 수행하였다.

FPS한 개당 가해지는 중력이 주어질 때 FPS 미끄럼면의 마찰계수 값이 작을수록 지진감시 시스템 제어 캐비닛과 Raised Floor가 만나는 부분에서의 가속도(Floor Response)와 구조물의 밀면 전단력 등이 작아져서 면진하기 전(기초고정)에 비하여 구조 성능이 월등히 좋아진다. 그러나 면진 층에서의 횡변위는 작은 마찰계수 때문에 큰 마찰계수를 사용한 경우보다 상대적으로 크므로 이 경우 점성 감쇠기를 도입하면 이 문제점은 해결될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년 전력산업기반기금 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 포함합니다.

참고 문헌

1. M.C. Constantinou, P. Tsopelas, Y-S. Kim, and S. Okamoto, " Experimental and Analytical Study of a Friction Pendulum System(FPS)". Technical Report NCEER-93-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, November, 1992.
2. V.A. Zayas, S.S. Low , and S.A. Mahim, " The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report", Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley , CA, June, 1987.
3. V.Lambrou and M.C. Constantinou, " Study of Seismic Isolation Systems for Computer Floors", Technical Report NCEER-94-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, July, 1994.