Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 14, No. 7 pp. 3502-3507, 2013

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.7.3502

스카이브릿지의 안전성확보를 위한 FPS 설계방법에 대한 연구

김현수[1*]
[1]선문대학교 건축학부

Study of Structural Design Method of Friction Pendulum System for Fail Safe of a Sky-Bridge

Hyun-Su Kim[1*]
[1]**Division of Architecture, Sunmoon University**

요 약 스카이브릿지가 연결되는 건물에 강접합될 경우에는 비정형성이 크게 되어 지진하중에 매우 불리하게 거동할 수 있다. 따라서, 마찰진자베어링(FPS)이나 납고무베어링(LRB)와 같은 연결시스템을 사용하여 스카이브릿지와 구조물을 연결하게 된다. 이러한 연결시스템은 큰 지진하중이 발생하였을 때 스카이브릿지가 연결된 건물에서 분리되어 낙교하지 않도록 신중하게 설계되어야 한다. 본 논문에서는 수직방향 인장력에대해서 저항성이 없는 마찰진자감쇠기를 이용한 연결시스템을 설계하는 과정에서 반드시 검토해야할 사항을 분석하였다. 이를 위하여 실제 시공된 누리꿈스퀘어를 예제구조물로 선택하였고 예상되는 지진하중이 가해졌을 때 스카이브릿지 연결시스템에서 발생하는 응답을 분석하여 낙교를 방지할 수 있는 설계 프로세스를 정립하였다.

Abstract If a sky-bridge is rigidly connected to adjacent buildings, the irregularity of the connected structures is increased resulting in providing a worse seismic behavior. Therefore, a friction pendulum system (FPS) or lead rubber bearing (LRB) is frequently used for the connection system between a sky-bridge and building structures. These connection systems should be carefully designed to prevent a skyfall of a sky-bridge subjected to severe seismic loads. In this paper, the inevitable structural design procedures for a sky-bridge connection system using a friction pendulum system without uplift resistance capacity have been investigated. To this end, Nuri Dream Square building structure is used as a example structure. The structural design process of a friction pendulum system for fail safe of a sky-bridge has been proposed in this paper by evaluating structural responses of the sky-bridge and building structures subjected to earthquake loads.

Key Words : Sky-Bridge, Fail Safe, Friction Pendulum System, Seismic Responses, Time History Analysis

1. 서론

스카이브릿지가 설치되는 두 개의 건물은 층수 및 형태가 동일한 경우도 많지만 연결되는 두 건물의 층수 및 평면의 형태가 달라서 건물들이 각각 다른 고유진동주기와 동적거동을 나타내는 경우도 흔히 발생한다. 스카이브릿지가 연결되는 두 건물에 강접합될 경우에는 연결된 전체구조물의 비정형성이 크게 되어 지진하중에 매우 불리하게 거동할 수 있다[1]. 따라서 지진하중이 구조물에 가해졌을 때 스카이브릿지에 의해서 발생하는 건물의 비정형성을 감소시키기 위해서는 연결되는 건물과 스카이브릿지가 각각 별도의 동적거동을 할 수 있도록 스카이브릿지 연결부의 이동을 허용하는 것이 일반적이다[2]. 이를 위해서는 스카이브릿지와 건물의 연결부에 마찰진자베어링(Friction Pendulum System; FPS)과 같이 변위를 허용할 수 있는 면진장치를 설치해야 한다[3]. 이렇게 건물과 스카이브릿지 사이를 격리시킴으로써 개별적인 동적거동을 유도하고 이를 통하여 스카이브릿지의 구조적

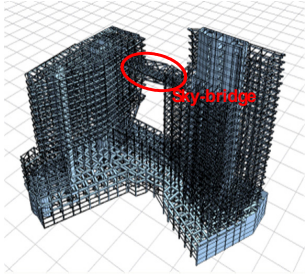
이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015166).
*Corresponding Author : Hyun-Su Kim(Sunmoon Univ.)
Tel: +82-41-530-2315 email: hskim72@sunmoon.ac.kr
Received April 10, 2013 Revised May 28, 2013 Accepted July 11, 2013

안전성과 사용성을 확보할 수도 있다. 그리고 스카이브릿지 연결부에 발생할 수 있는 과도한 응력집중현상도 방지하여 구조물의 손상도 피할 수 있다. 일반적으로 사용되는 FPS는 수직방향 인장력에 대해서 저항력이 없으므로 지진하중이 가해져서 FPS가 설치된 스카이브릿지에 수직방향 인장력이 작용한다면 낙교의 위험성이 커지게 되고 이는 경제적 피해 및 치명적인 인명손실로 이어질 수 있으므로 이를 방지할 수 있는 체계적인 FPS 구조설계방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 지진하중을 받는 구조물에 FPS 베어링을 사용하여 연결된 스카이브릿지의 낙교를 방지하고 안전성을 확보할 수 있는 설계과정을 정립하고자 한다.

2. N 빌딩구조물의 구조적 특성

본 논문에서는 Fig. 1에 나타낸 상암동에 건설된 N 빌딩을 예제구조물로 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 동의 건물(IT 비즈니스 센터, R&D 센터)과 이를 연결하는 스카이브릿지(IT 캡슐)로 구성되어 있다. 이 스카이브릿지는 두 동의 건물과 FPS 베어링을 이용하여 연결되어 연결부의 이동을 허용하게 된다. N 빌딩이 건설될 대지는 좋지 않은 지반조건(S_D) 때문에 비교적 큰 지진하중에 대하여 설계가 되어야 하므로 두 동과 연결통로 사이의 연결방법을 결정하는 것은 구조적으로 매우 중요한 문제이다.

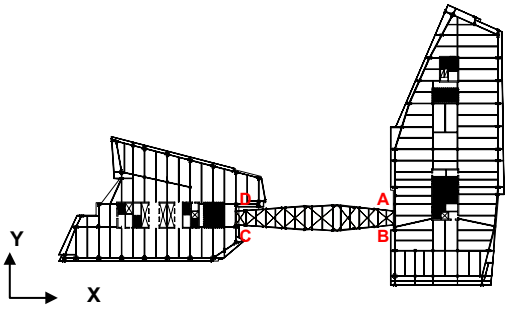
(a)



(b)

[Fig. 1] Example structure

N 빌딩의 연결층 평면을 Fig. 2에 나타내었다. 그림의 오른 편에 있는 IT 비즈니스 센터는 지상 22층의 SRC 구조로서 횡력은 두께 40cm의 중앙 코어에 의하여 지지된다. 건물은 건축의장상의 이유로 외관을 볼록한 곡면으로 이루어지도록 설계하여 외부기둥 또한 만곡형상으로 이루어져 있다. 고유치해석결과 IT 비즈니스 센터의 X 방향 주요 모드는 3차 및 6차 모드가 되고 그 때의 고유진동주기는 각각 1.65초와 0.45초이다. 왼편에 있는 R&D 센터는 지상 16층의 SRC 구조로서 횡력은 두께 40cm의 코어에 의하여 지지되며 코어는 중심 간격으로 약 37m 정도 서로 떨어진 큰 코어(9.7m×18.2m)와 작은 코어(6.9m×9.1m)로 구성된다. R&D 센터의 X 방향 주요 모드는 1차 및 5차 모드가 되고 그 때의 고유진동주기는 각각 2.56초와 0.46초로서 IT 캡슐과 연결되는 FPS의 주기는 이러한 건물의 주요 고유진동주기를 피해서 설계하는 것이 바람직하다. IT 비즈니스센터의 1차 모드 고유진동주기는 3.23초로서 R&D센터보다 길지만 Y방향 모드이므로 고려대상에서 제외된다. 스카이브릿지인 IT 캡슐은 56.4m의 스팬을 가진 입체트러스 구조로서 그 무게는 약 7,400kN에 달한다. 이 IT 캡슐은 FPS를 이용한 지점방식으로 두 건물사이에 연결된다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 IT 캡슐은 두 건물과 4개의 베어링을 통해서 연결되는 데 4개의 FPS 위치도 그림에 나타내었다.

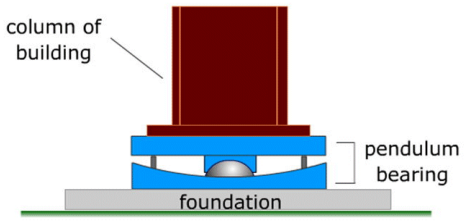


[Fig. 2] Plan of example structure

3. 마찰진자베어링

면진시스템의 한 종류인 FPS는 지진으로부터 구조물을 보호하기 위하여 일반적으로 구조물과 기초사이에 설치되는 면진시스템이다. FPS는 면진 구조물의 주기를 늘리기 위하여 진자(Pendulum)의 특성을 이용한다. 즉, 지진이 작용하면 베어링 내의 슬라이더(articulate slider)가 오목면을 따라 움직이고 이때 지지되는 구조물은 부드러운 진자운동을 하면서 올라간다. 슬라이더의 움직임은 마

찰력을 발생시키며, 이러한 마찰작용은 지진에너지를 흡수하는 감쇠작용을 한다.

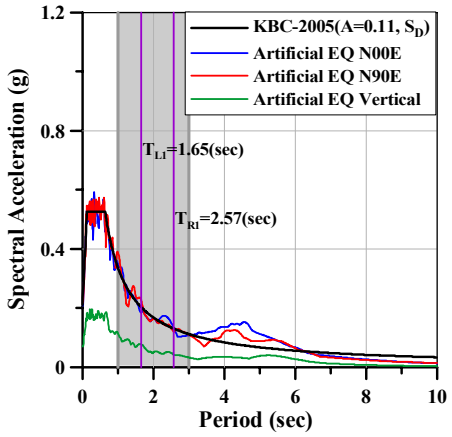


[Fig. 3] Configuration of FPS

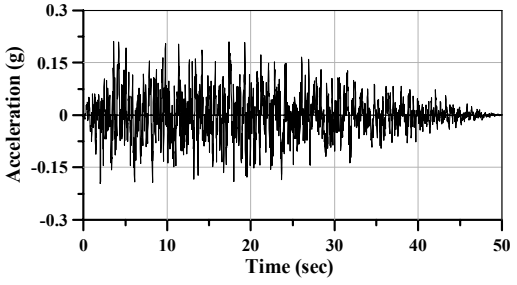
스카이브릿지가 FPS로 연결될 때 지진하중이 정지마찰력보다 작으면 구조물과 강접된 것처럼 응답하지만, 지진하중이 일단 정치마찰력을 초과하면 스카이브릿지의 주기는 면진장치의 수평 유연성에 의하여 길어지게 된다. 이러한 면진시의 주기는 오목면의 곡률반경 R에 의하여 결정된다. FPS 베어링으로 면진되는 구조물의 주기는 단지 오목면의 곡률반경에 의해서만 결정되므로 구조물이 무게와 상관없이 일정한 주기를 가지게 된다. 그러나 베어링의 강성은 지지되는 중량에 비례하게 된다. 면진시스템 FPS의 횡강성 중심은 구조물의 질량중심과 일치하게 되는데 이러한 특성은 편심질량에 의하여 야기되는 구조물의 비틀림을 감소시킨다. 마찰력도 구조물의 질량에 비례하므로 면진시스템의 강도(rigidity) 중심도 구조물의 질량중심과 일치한다. 그리고 FPS는 고유주기, 저항할 수 있는 하중의 크기, 감쇠 및 변위한계 등이 서로 독립적이므로 지지되는 구조물에 필요한 베어링의 특성에 적합하게 설계하기가 용이하다.

4. 인공지진하중

본 논문에서는 건설교통부 고시 건축구조설계기준(KBC2005)에 제시된 내용을 바탕으로 작성한 설계응답스펙트럼을 지진하중으로 사용한다. N 빌딩은 SRC 구조로서 반응수정계수(R)를 5로 하여 설계가 수행되었다. 본 논문에서는 FPS에서 발생하는 상대변위 및 가속도를 검토할 때에는 반응수정계수를 사용하지 않은 설계응답스펙트럼을 이용하였고 베어링반력을 검토할 때에는 반응수정계수로 저감시킨 설계응답스펙트럼을 이용하였다. 설계응답스펙트럼 작성 시 지역계수는 0.11을 사용하였고 지반종류는 S_D를 사용하였다. 본 논문에서는 인공지진을 사용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 각각의 지진하중은 앞에서 설명한 설계응답스펙트럼을 기준으로 Scaling하여 사용하였다. 수평방향 인공지진은 그림 Fig. 4와 같이 설계응답스펙트럼을 기초로 하여 생성하였다. 그림에 나타낸 설계스펙트럼은 수평방향 하중에 대한 것이므로 수직방향 인공지진은 단주기 스펙트럼의 1/3에 맞추어 Scaling하였다. 이렇게 Scaling한 지진하중의 가속도 시간이력을 Fig. 5에 나타내었다. 베어링의 반력검토를 위해서는 Fig. 4에 나타낸 설계응답스펙트럼을 반응수정계수로 저감시킨 스펙트럼에 맞추어 지진하중을 Scaling하였다.



[Fig. 4] Design response spectrum with artificial EQ.

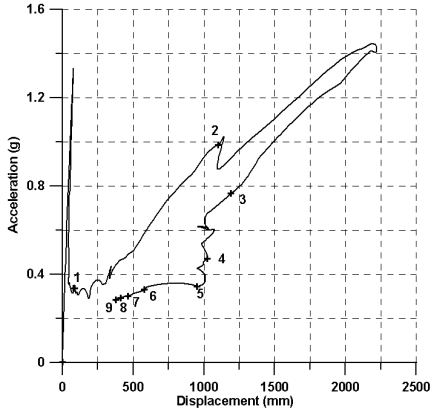


[Fig. 5] Ground acceleration of artificial EQ

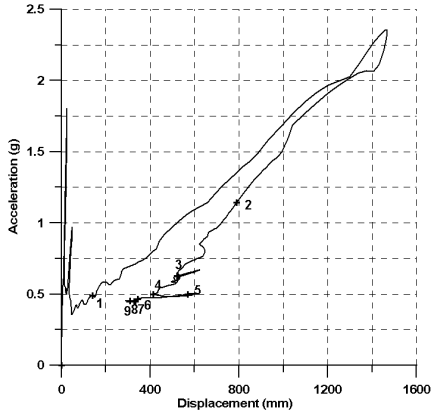
5. FPS 설계 및 검토 프로세스

N 빌딩의 IT 비즈니스 센터 및 R&D 센터와 IT 캡슐이 연결되는 연결부에 사용될 4개의 FPS에서 발생하는 지진응답을 줄이는 것이 본 논문의 목적이다. 베어링이 설치될 두 건물의 지점에서 Floor Spectrum을 그려본다면 베어링의 주기에 따른 동적응답의 변화를 용이하게 파악할 수 있다. 따라서 IT 비즈니스 센터(베어링 D)와 R&D 센터(베어링 A)에 IT 캡슐이 연결되는 지점에서의

변위-가속도 Spectrum을 Figs. 6, 7에 나타내었다. 이때 Floor Spectrum의 작성에 사용된 감쇠비는 5%이다. 그림에서 볼 수 있듯이 베어링 A는 약 2.5초 베어링 B는 약 1.7초에서 가속도 및 변위의 응답이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 주기대역을 벗어나도록 베어링을 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. 만약 이 주기대역의 베어링을 사용한다면 마찰계수를 높게 하여 감쇠효과를 높이는 것이 필요하다.



[Fig. 6] Acceleration-Displacement spectrum at FPS A



[Fig. 7] Acceleration-Displacement spectrum at FPS D

본 논문에서는 N 빌딩의 IT 캡슐에 사용될 적절한 FPS를 설계하기 위하여 다양한 주기를 가지는 FPS를 사용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 FPS의 주기와 그 때의 FPS의 반지름 및 횡방향 강성을 Table 1에 나타내었다. 베어링의 주기를 변화시키면 Table 1에 나타낸 바와 같이 베어링의 곡률반경이 변경된다. 즉 주기가 짧아지면 베어링의 곡률반경이 작아지고 주기가 길어지면 베어링의 곡률반경이 커지게 된다. FPS로 면진되는 구조물의 주기는 구조물의 무게와 관계없이 식 (1)과 같이 단지 오목면의 곡률반경에 의해서만 결정되며 이 식을 이용하여 주기에 따른 반지름을 계산하였다.

$$T = 2\pi\left(\frac{R}{g}\right)^{1/2} \tag{1}$$

여기서, R=곡률반경, g=중력가속도를 나타낸다. FPS의 횡방향 강성은 식 (2)와 같이 곡률반경(R)과 면진되는 구조물의 무게(W)에 의하여 결정된다.

$$K = \frac{W}{R} \tag{2}$$

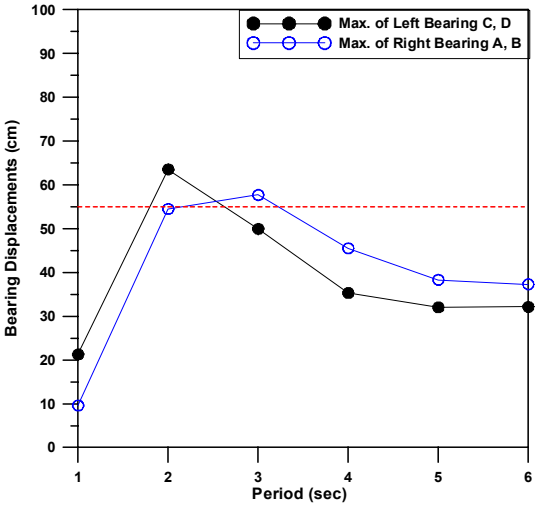
[Table 1] Radius and stiffness of FPS w/ natural period

Period(sec)	Radius(cm)	Stiffness(kN/cm)
1	24.83	74.52
2	99.30	18.63
3	223.44	8.28
4	397.22	4.66
5	620.66	2.98
6	893.74	2.07

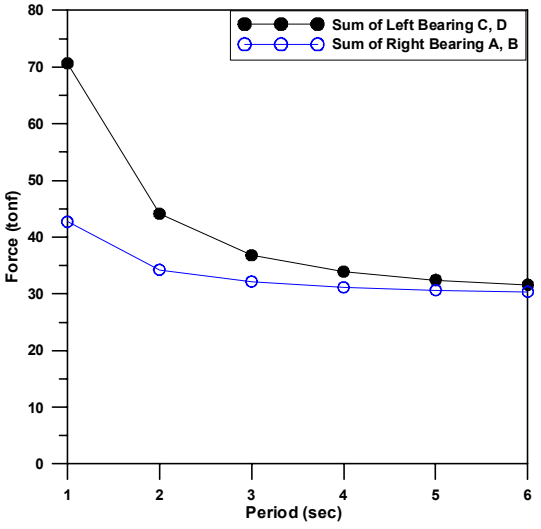
1초에서 6초까지의 주기를 가지도록 설계한 6가지 종류의 FPS를 모형화하여 IT 캡슐과 두 건물사이를 연결한 후 구조물에 인공지진하중을 가하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였고 이때 FPS의 마찰계수는 8%를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 MIDAS/GEN은 N 빌딩의 경우와 같이 두 동의 건물을 함께 해석하는 모델에 대해서는 등가정적해석을 수행할 수 없으므로 경계비선형 동적해석만을 수행하여 결과를 분석하였다. 본 예제구조물에서는 건축적인 제약조건에 의해서 FPS에서 발생할 수 있는 최대 변위를 55cm로 두고 FPS의 응답을 검토하였다.

베어링의 주기변화에 따른 해석결과를 보다 쉽게 파악하기 위하여 Fig. 8-10에서 보는 바와 같이 FPS 주기 변화에 따른 베어링응답의 변화 그래프를 작성하였다. 전술한 바와 같이 변위를 검토할 때에는 반응수정계수를 적용하지 않은 설계응답스펙트럼을 사용하였고 베어링의 반력을 검토할 때에는 반응수정계수를 적용한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. Fig. 8의 FPS의 주기에 따른 베어링 변위의 변화 그래프를 보면 마찰계수 8%인 경우 2-3초 주기를 가지는 FPS를 사용하였을 때 허용변위를 초과하는 것을 알 수 있다. Fig. 9 및 10에 나타낸 베어링의 반력은 IT 캡슐의 좌측 베어링(Bearing C, D) 반력의

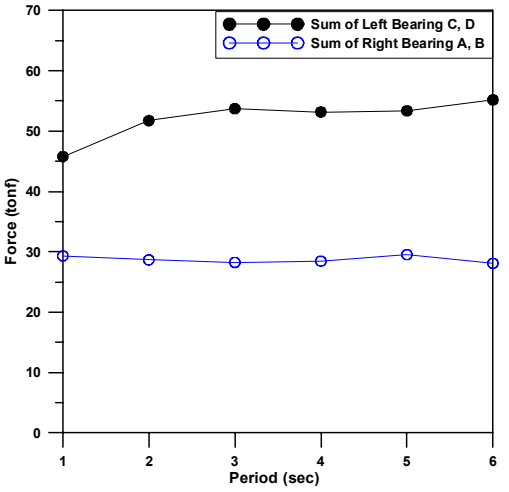
합과 우측 베어링(Bearing A, B) 반력의 합을 표시하여 건물의 설계시 고려할 하중을 쉽게 파악하도록 하였다. Fig. 9에 나타낸 FPS 주기에 따른 베어링 X방향 반력의 변화를 보면 단주기 일 때에는 값이 크고 주기가 길어짐에 따라서 반력이 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 Y방향 반력은 다른 응답에 비하여 FPS의 주기변화에 따른 영향을 크게 받지 않는다. 이는 Y방향에 대해서는 IT 캡슐과 두 건물이 강접합되어 있기 때문에 FPS의 주기 변화가 Y방향 응답에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다.



[Fig. 8] Displacements of FPS



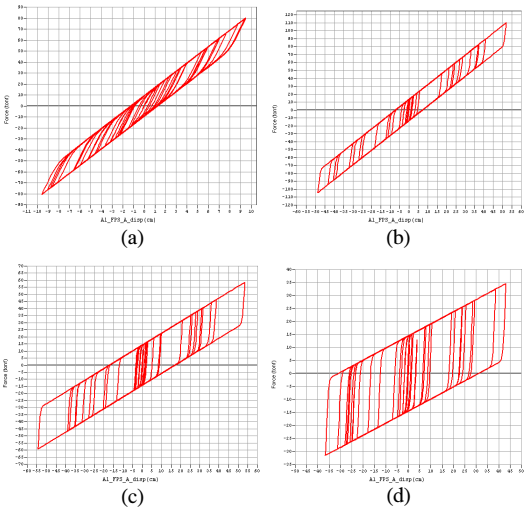
[Fig. 9] Reactions of FPS (X-Direction)



[Fig. 10] Reactions of FPS (Y-Direction)

FPS의 고유진동주기가 1초인 경우를 보면 베어링의 X방향 변위가 허용변위(55cm) 이내로 들어오는 것을 알 수 있다. 그러나 이 경우에는 앞에서 설명한 바와 같이 베어링의 곡률반경이 24.83cm로 매우 작기 때문에 수평방향 변위에 의한 수직방향 변위가 커지게 되고 만약, 지진하중의 크기가 커져서 곡률반경 이상의 변위를 허용해야할 경우에는 베어링으로서의 역할을 수행할 수 없기 때문에 실제로 적용하기에는 어려움이 있다고 판단된다.

IT 캡슐이 연결될 위치에서의 IT 비즈니스 센터와 R&D 센터의 Floor Spectrum을 보면 2-3초사이의 구간에서 변위 및 가속도응답이 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 FPS의 주기를 2초와 3초로 모형화하였을 때의 결과를 보면 FPS의 허용변위를 초과하는 것을 알 수 있다. 따라서 FPS의 고유진동주기를 설계할 때 2-3초 구간은 피하는 것이 필요하다고 판단된다. 수치해석 결과를 보면 Z방향 가속도는 중력가속도(980cm/sec^2)에 비하여 매우 작기 때문에 IT 캡슐의 Uplift 가능성은 거의 없는 것으로 해석결과 확인되었다. 5초 이내의 고유진동주기를 갖는 FPS의 변위를 줄이기 위해서는 FPS의 마찰계수를 크게 하여 감쇠효과를 높이는 것이 필요하다. 수치해석결과 FPS(A위치)의 X방향 힘-변위 이력곡선을 Fig. 11에 나타내었다. FPS의 고유진동주기를 짧게 하면 곡률반경이 작아지게 되므로 베어링의 강성이 커지게 된다. 따라서 FPS의 고유진동주기가 길어질수록 힘-변위 이력곡선의 기울기가 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. FPS의 고유진동주기가 길어질수록 이력곡선의 면적이 커지므로 FPS에서 소산되는 에너지가 더 많아지는 것을 알 수 있다.



[Fig. 11] Force-displacements relationship of FPS
(a) Period 1 sec (b) Period 2 sec (c) Period 3 sec (d) Period 4 sec

5. 결론

본 논문에서는 예제구조물로 선택한 N 빌딩에 설치될 스카이브릿지의 FPS에 대해서 설계방법을 살펴보고 성능을 검토하였다. 이를 위하여 FPS의 마찰계수 8%사용하여 고유진동주기를 1초에서 6초까지 변화시켜 베어링의 응답을 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스카이브릿지가 설치될 위치에서의 구조물의 Floor Spectrum 분석을 통해서 가장 불리한 FPS 고유진동주기를 쉽게 파악할 수 있었다. 따라서 스카이브릿지의 낙교 방지를 위해 FPS의 응답을 최소화할 수 있는 고유진동주기는 Floor Spectrum을 통해서 쉽게 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
2. 본 논문에서 선택한 예제구조물의 경우에는 지반조건이 좋지 않아서 지진하중이 일반적인 경우보다 큼에도 불구하고 FPS의 고유진동주기에 관계없이 스카이브릿지의 Uplift는 발생하지 않았다.
3. FPS의 고유진동주기에 의해서 원하는 응답 이하로 줄일 수 없을 때에는 FPS의 마찰계수를 증가시키는 것이 필요하다. 그리고 일반적으로 FPS의 고유진동주기가 길어질수록 힘-변위 이력곡선의 면적이 커지므로 FPS에서 소산되는 에너지가 많아지게 됨을 알 수 있다.

References

[1] D.G. Lee, H.S. Kim, H. Ko “Evaluation of Coupling-Control Effect of a Sky-Bridge for Adjacent Tall Buildings”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 21,, pp.311- 328, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.1002/tal.592

[2] J. Lim, B. Bienkiewicz, E. Richards “Modeling of structural coupling for assessment of modal properties of twin tall buildings with a skybridge”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 99, No. 5, pp.615- 623, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2011.02.010

[3] M.C. Constantinou, T.T. Soong, Passive and active structural vibration control in civil engineering, New York, 1994.

김 현 수(Hyun-Su Kim) **[정회원]**

- 1995년 2월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 성균관대학교 건축공학과 (공석박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축학부 조교수

<관심분야>
구조해석, 진동제어