

스카이브릿지로 연결된 고층건물의 진동제어 성능평가

Performance Evaluation of Vibration Control of High-rise Buildings Connected by Sky-Bridge

김 현 수* 양 아 람** 이 동 근*** 안 상 경**** 오 정 근*****
Kim, Hyun-Su Yang, Ah-Ram Lee, Dong-Guen Ahn, Sang-Kyung Oh, Jung-Keun

요 약

본 연구에서는 sky-bridge로 연결된 고층건물의 진동제어성능을 검토하여 보았다. Sky-bridge를 이용한 진동제어의 원리는 서로 다른 동적특성을 가진 구조물이 sky-bridge를 통하여 제어력을 발휘함으로써 전체 시스템의 응답을 줄이는 것이다. 본 연구에서는 실제 건설 중인 sky-bridge로 연결된 고층건물(49층 및 42층)을 대상으로 구조물의 변위, 가속도 및 베어링반력, sky-bridge의 응력 등을 해석적인 방법으로 검토하였다. 이를 위하여 역사지진, 인공지진 및 풍동실험을 통해서 얻은 풍하중 시간이력을 사용하였다. 해석결과 sky-bridge를 사용하여 고층건물의 풍응답 및 지진응답을 효과적으로 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, the vibration control performance of high-rise building structures connected by a sky-bridge has been investigated. The philosophy of vibration control using sky-bridges is to allow structures with different dynamic characteristics to exert control forces upon one another through sky-bridges to reduce the overall responses of the system. The the high-rise building structure connected by sky-bridge with 49 and 42 stories was used in this study to investigate the displacement, acceleration, reaction of bearings and stress of sky-bridge by analytical methods. To this end, historical earthquakes, an artificial earthquake and wind force time histories obtained from wind tunnel tests were used. Based on the analytical results, the use of sky-bridge can be effective in reducing the structural responses of high-rise buildings against wind and seismic loads.

키워드 : 진동제어, 스카이브릿지, 고층건물, 면진장치, 감쇠기

Keywords : vibration control, sky-bridge, high-rise buildings, seismic isolation system, damper

1. 서 론

근래에는 경제적인 이유로 인하여 좁은 대지에 고층건물을 매우 가까운 거리에 인접하여 배치하는 경우가 점차 증가하고 있다. 이러한 인접한 고층건물을 진동제어장치로 연결하여 바람이나 지진에 의하여 발생하는 진동이나 변위를 제어하는 방법에 대한 연구¹⁻⁸⁾가 지금까지 몇몇 연구자들에 의하여

수행되어 그 가능성이 제시되어 왔다. 이것은 두 건물의 고유진동수 차이와 같은 동적특성의 차이를 이용하는 것이며, 각각의 건물에서 발생하는 동적응답이 서로 다른 주기로 진동함으로써 상호간의 응답을 상쇄되게 하여 전체적인 구조물의 진동응답을 저감시키도록 유도하는 것이다. 최근 sky-bridge로 연결된 고층건물이 많이 건설되고 있는데 이러한 sky-bridge는 두 구조물을 연결하여 화재와 같은 비상시에 대피 및 피난통로의 용도 등 건축적인 이유로 설치되고 있다. 따라서 고층건물들을 연결하는 추가적인 장치를 설치하지 않고 건축적인 목적으로 설치되어 있는 sky-bridge를 이용하여 연결된 건물의 진동을 제어하고자하는 연구가 시도되고 있다. 대부분의 기존 연구는 해석의 편의를 도모하기 위

* 교신저자, 정회원 · 신문대학교 건축학부 전임강사
Tel : 031-530-2315 Fax : 031-530-2839
E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

** 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

*** 성균관대학교 건축공학과 교수

**** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원

***** 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 수석연구원

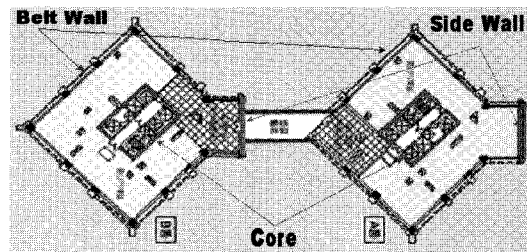
하여 단순한 전단건물을 예제모델로 선정하여 수치 해석적 방법으로 수행되었다. 또한 2차원 구조물에 대한 연구²⁻⁸⁾가 대부분이며 연구의 목적이 sky-bridge에 의한 진동제어성능 검토에 국한되어 있다. 따라서 3차원의 실제 건물에 적용할 때 발생할 수 있는 문제나 두 건물의 진동제어시 sky-bridge에서 발생하는 응력문제, sky-bridge가 설치될 건물 연결부의 지점반력문제 등의 검토가 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 2008년 6월 현재 목동에 건설되고 있는 <그림 1>에 나타난 고층 주상복합건물을 대상으로 sky-bridge를 활용한 진동제어성능의 개선도를 평가해보고자 한다. 이를 통하여 기존 연구에서 부족하였다고 평가되는 sky-bridge를 이용한 고층건물 진동제어의 실제 가능성을 검토할 것이다. Sky-bridge를 고층건물의 진동제어에 이용할 경우에 가장 중요한 점은 해당 구조물 특성 및 건축적 요구사항에 적합한 연결시스템을 선정하는 것이다. 본 연구에서는 다양한 연결시스템을 이용하여 sky-bridge를 활용한 진동제어 성능 및 실제 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 역사지진 및 인공지진을 사용한 지진응답 제어성능을 평가하였으며 풍동실험을 통하여 얻은 풍하중 시간이력데이터를 이용하여 내풍성능을 검토하였다. 수치해석은 MIDAS/Gen을 사용하여 수행하였고 연결시스템의 거동모사를 위하여 경계비선형 시간이력해석을 실시하였다.



<그림 1> 목동 트라펠리스 조감도

2. 대상 건물의 개요

본 연구에서 대상으로 하는 구조물은 서울시 양천구에 시공되고 있는 주상복합건물로서 <그림 1>에 나타난 바와 같이 지상 49층과 42층의 건물 2개동이 건설되고 있다. 구조물은 RC조로 계획되어 있으며 철골조로 된 sky-bridge는 34층에 설치된다. Sky-Bridge가 설치될 곳의 건물간 거리는 약 10m~15m 내외이며, 평상시에는 주민들의 커뮤니케이션을 위한 통로로 사용되고, 화재와 같은 비상시에는 비상통로로 이용될 수 있도록 설계되었다. 본 대상 건물의 주요 구조시스템을 살펴보면 <그림 2>와 같다. 기본적으로 횡력에 대해서는 내부의 코어(Core)가 저항하게 되며, 주로 기계실로 사용되는 34층에는 belt wall이 설치되어 횡력에 저항하도록 하고 있다.



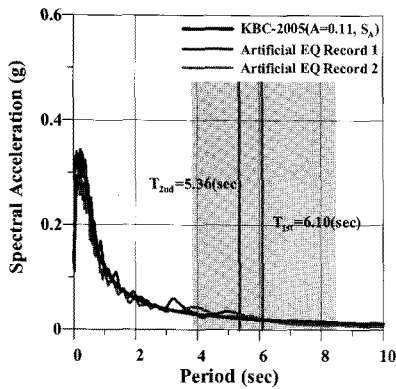
<그림 2> 대상 건물의 구조시스템

3. 지진하중 및 풍하중

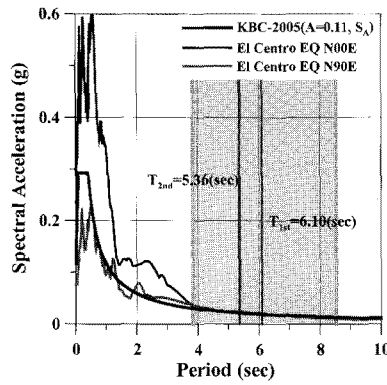
Sky-bridge로 연결된 고층건물의 진동제어성능 평가를 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 지진하중 및 풍하중을 사용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다.

2.1 지진하중

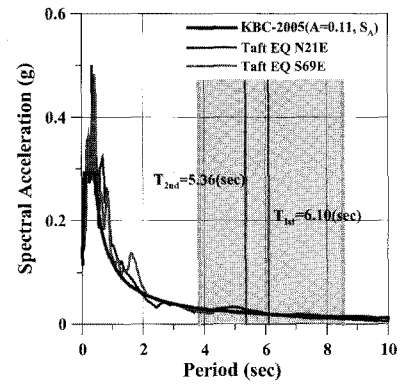
본 연구에서는 KBC2005⁹⁾에 제시된 설계응답스펙트럼을 바탕으로 작성한 지진하중시간이력을 사용한다. 설계응답스펙트럼 작성 시 지역계수 및 지반종류는 대상건물이 건설될 대지를 기준으로 삼아 0.11 및 SA를 사용하였다. 본 연구에서는 인공지진, El Centro 지진(1940) 및 Taft 지진(1952)을 사용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 각각의 지진하중은 앞에서 설명한 설계응답스펙트럼을 기



<그림 3> 인공지진 응답스펙트럼



<그림 4> El Centro지진 응답스펙트럼



<그림 5> Taft지진 응답스펙트럼

준으로 Scaling하여 사용하였다. 즉, 인공지진 및 El Centro, Taft 지진 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 3.80초에서 8.63초사이의 면적을 같도록 지진하중을 조정하였다. 이렇게 한 이유는 sky-bridge가 없을 때의 건물의 1차 및 2차 고유진동주기가 <그림 3~5>에 나타낸 바와 같이 각각 6.10초 및 5.36초이므로 구조물의 동적거동에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 진동수대역($5.36/\sqrt{2}$ - $6.10 \times \sqrt{2}$)에서 설계 응답스펙트럼의 특성을 나타낼 수 있도록 각각의 지진하중을 scaling하기 위해서이다. 이렇게 조정된 지진하중의 가속도 시간이력을 <그림 6~8>에 나타내었다.

본 연구에서는 2방향 지진해석을 수행하기 위하여 <표 1>에 나타낸 바와 같이 scaling한 지진하중

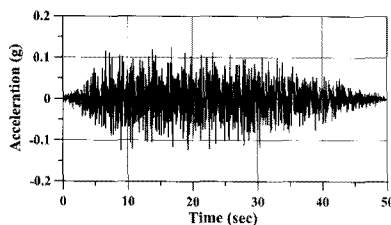
을 해석모델의 축 방향별로 가하여 해석하였고 이를 Load Case로 구분하여 나타내었다.

<표 1> 해석모델축 방향별 지진하중

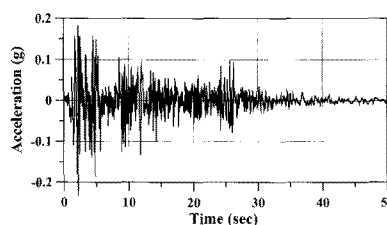
Load Case	X-방향 하중	Y-방향 하중
A1	Artificial Record1	Artificial Record2
A2	Artificial Record2	Artificial Record1
E1	El Centro N00E	El Centro N90E
E2	El Centro N90E	El Centro N00E
T1	Taft N21E	Taft S69E
T2	Taft S69E	Taft N21E

2.2 풍하중

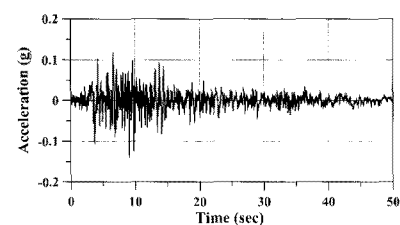
본 연구의 대상건물은 목동에 실제로 건설되고 있는 구조물로서 이 건물에 대한 풍동실험이 수행



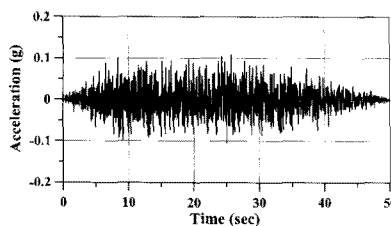
(a) Artificial Record1



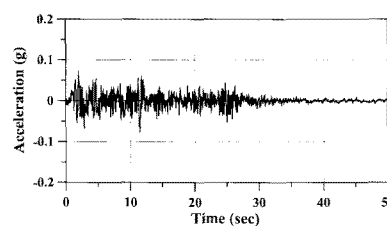
(a) N00E 지반가속도



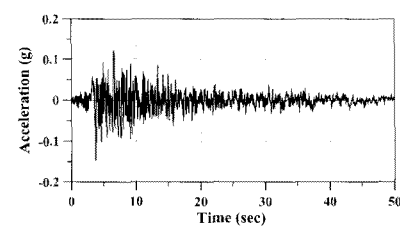
(a) N21E 지반가속도



(b) Artificial Record2



(b) N90E 지반가속도

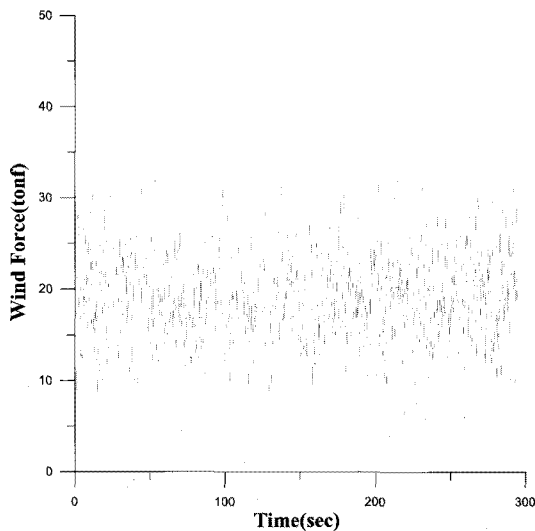


(b) S69E 지반가속도

<그림 6> 인공지진하중의 가속도 시간이력

<그림 7> El Centro 지진의 가속도 시간이력 <그림 8> Taft 지진의 가속도 시간이력

된 바 있다. 본 연구에서는 풍동실험을 통하여 계측한 49층 및 42층 건물의 풍압데이터를 이용하여 풍하중을 생성한 후 이를 이용하여 풍하중에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 계측된 여러 층의 데이터 중에서 49층 건물의 최상층 풍하중시간이력을 <그림 9>에 나타내었다. 본 연구에서는 풍하중을 X방향 및 Y방향으로 가했을 때의 Load Case를 각각 Wind-X 및 Wind-Y로 나타내었다.

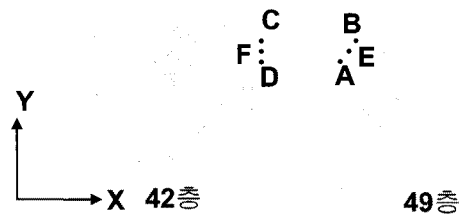


<그림 9> 49층 건물의 최상층 풍하중 시간이력

4. Sky-bridge 연결시스템

본 연구의 대상 건물은 <그림 2>에 나타난 바와 같이 두 동의 건물과 이를 연결하는 sky-bridge로 구성되어 있다. 두 동의 건물은 서로 층수가 다르므로 각각 다른 진동주기를 가지게 되며 이를 연결하는 sky-bridge가 두 동에 강접합될 경우에는 비정형성이 크게 되어 지진하중에 매우 불리하게 거동할 수 있다. 따라서 두 동과 sky-bridge 사이의 연결방법을 결정하는 것은 구조적으로 매우 중요한 문제이다. 지진하중이 대상건물에 가해졌을 때 sky-bridge의 구속에 의해서 발생하는 건물의 비정형성을 감소시키기 위해서는 두 동의 건물과 sky-bridge가 각각 별도의 동적거동을 할 수 있도록 sky-bridge 연결부의 이동을 허용하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 통로와 건물의 연결부에 적절한 베어링을 설치하여 변위를 허용할 수 있도록 해야 한

다. 이렇게 건물과 sky-bridge 사이를 격리시킴으로써 개별적인 동적거동을 유도하고 이를 통하여 sky-bridge의 구조적 안전성과 사용성을 확보할 수 있다. 그리고 연결부에 발생할 수 있는 과도한 응력집중현상도 방지하여 구조물의 손상도 피할 수 있다. 본 연구에서는 sky-bridge에 의하여 발생하는 대상 건물의 구조적 비정형성을 없애고 더 나아가 두 건물의 상호작용에 의한 제진효과를 얻기 위하여 납을 삽입한 LRB(Lead Rubber Bearing)를 사용하고 그 타당성을 검토하고자 한다. 그리고 베어링 및 연결장치에서 발생할 수 있는 과도한 변위를 줄이고 허용 가능한 베어링 반력이 발생하는지 확인하고자 한다. 대상건물은 건축적인 제약조건에 의하여 sky-bridge가 건물에 연결되는 위치에서 <그림 10>의 X축으로는 상대변위를 허용하지만 Y축으로는 상대변위를 허용하지 못한다. 따라서 LRB와 같은 양방향 상대변위를 허용하는 베어링만으로는 요구조건을 만족시키기 어려우며 1방향 변위만 허용하는 LM 가이드를 추가적으로 사용하는 것이 필요하다.

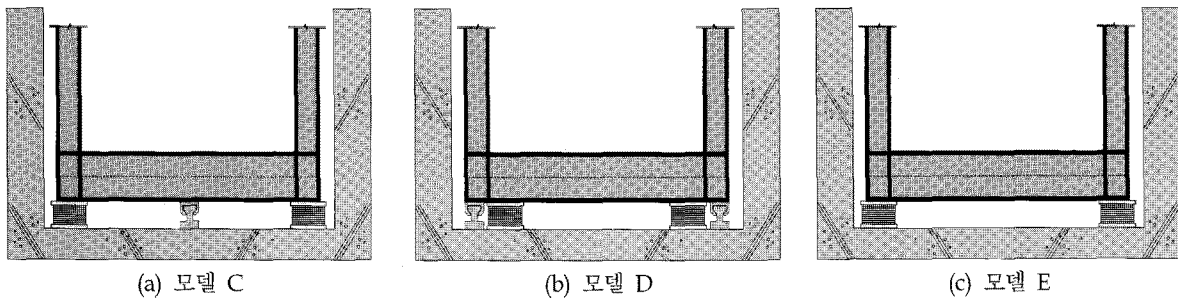


<그림 10> 연결층 평면

이와 같은 조건을 고려하여 본 연구에서는 두 건물과 sky-bridge의 연결을 위하여 <그림 10>에 나타난 바와 같이 6곳의 위치에 베어링을 사용하였으며 각 위치에서 사용한 베어링의 특성에 따라서 <표 2>에 나타난 5개의 해석모델을 선택하여 해석

<표 2> Sky-bridge 연결시스템에 따른 해석모델

해석모델	모델 특징
모델 A	sky-bridge 없는 모델
모델 B	sky-bridge를 건물에 직접연결
모델 C	4개의 LRB와 2개의 LM 가이드로 연결
모델 D	4개의 LRB와 4개의 LM 가이드로 연결
모델 E	4개의 LRB만으로 연결



〈그림 11〉 모델별 연결부 상세

을 수행하였다.

모델 A는 sky-bridge를 사용하지 않은 모델이고 모델 B는 sky-bridge와 두 건물을 강접으로 연결한 모델로서 구조물의 비정형성이 클 것으로 예상된다. 모델 C와 모델 D는 LM 가이드와 LRB를 이용하여 sky-bridge와 구조물을 연결한 모델로서 sky-bridge가 X방향으로만 움직일 수 있도록 하였다. 이때 모델 C는 2개, 모델 D는 4개의 LM 가이드를 각각 이용하였다. LM 가이드를 설치할 때 모델 D와 같이 LRB위치에 함께 설치하는 것이 일반적이지만 대상 구조물의 sky-bridge는 <그림 10>에 나타난 바와 같이 49층 건물에 연결되는 부분이 경사져있다. 따라서 Y방향 하중이 가해졌을 때 지렛대의 효과로 <그림 10>의 A점과 B점의 LM 가이드에서 레일과 직각방향의 큰 반력이 발생할 가능성이 있다. 따라서 모델 C와 같이 sky-bridge 단부의 가운데에만 LM 가이드를 설치하는 모델을 사용하였다. 모델 E는 LM 가이드를 사용하지 않고 LRB로만 연결을 함으로써 sky-bridge가 2방향으로 움직일 수 있도록 하였다. 모델 C-E의 해석모델별 연결부 상세를 <그림 11>에 나타내었고 본 연구에서 사용한 LRB의 특성치를 <표 3>에 나타내었다. 사용한 LRB는 sky-bridge의 무게를 고려하여 설계되었다. 본 연구에서

〈표 3〉 Sky-bridge 연결시스템에 따른 해석모델

LRB 모델	N1	N2
면진장치 직경	40 cm	50 cm
면진장치 높이	24 cm	34 cm
납의 직경	10 cm	10 cm
초기 수평강성	3.23 tonf/cm	4.30 tonf/cm
초기 항복하중	6.90 tonf	7.40 tonf
항복후 수평강성	0.26 tonf/cm	0.42 tonf/cm
수직강성	105.35 tonf/cm	137.80 tonf/cm

는 대상건물과 sky-bridge의 연결시스템 이외에 감쇠기를 추가적으로 설치하였을 때의 진동제어성능을 검토하였으며 이를 위하여 사용한 점성감쇠기 모델을 <표 4>에 제시하였다.

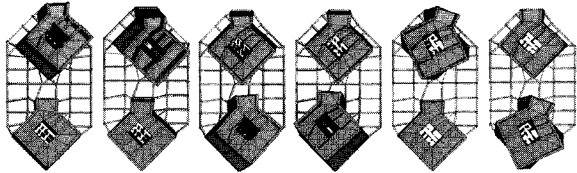
〈표 4〉 점성감쇠기 모델

모델명	모델 특징
c0	추가된 점성감쇠기 없음
c5	5tonf·sec/cm의 점성감쇠기 4개를 LRB위치에 각각 추가한 모델
c10	10tonf·sec/cm의 점성감쇠기 4개를 LRB위치에 각각 추가한 모델

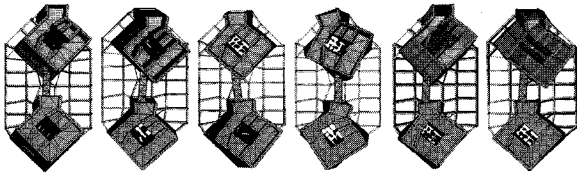
5. 고유진동주기 및 모드형상 비교

본 연구에서 사용한 각 모델별 고유진동주기와 모드형상을 <표 5>와 <그림 12~16>에 나타내었다. 모델 A에 비하여 모델 B는 sky-bridge를 두 건물에 강접으로 연결하였기 때문에 구조물의 강성이 증가하여 고유진동주기가 짧아진다. 또한 sky-bridge에 의하여 두 건물의 움직임이 구속되므로 sky-bridge 및 연결부분에 매우 큰 응력이 발생할 것으로 예측된다. 모델 C는 sky-bridge가 1방향으로만 이동을 하도록 하고 <그림 10>에 E와 F의 위치에 2개의 LM 가이드만을 사용함으로써 두 건물이 sky-bridge에 직각방향으로 이동할 때에도 sky-bridge의 연결부에서 큰 응력이 발생하지 않도록 하였다. <그림 12>와 <그림 14>를 비교하여 보면 대부분의 모드에서 모델 C와 모델 A의 고유진동주기가 같을 것을 알 수 있다. 모델 D는 sky-bridge 방향으로만 이동이 가능하도록 하고 4개의 LM 가이드를 사용함으로써 sky-bridge 직각방향 이동을 구속하는 효과가 있다. 따라서 모델 D의 고유진동주기는 모델

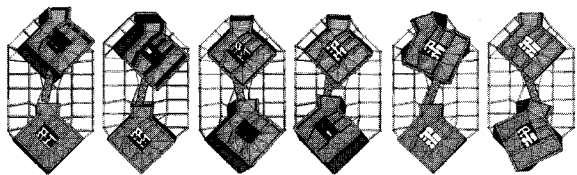
A보다 조금 짧아지는 것을 알 수 있다. 모델 E는 LM 가이드가 없이 LRB만을 사용하여 sky-bridge를 연결함으로써 sky-bridge가 2방향으로 움직일 수 있고 사용한 LRB의 강성이 매우 작기 때문에 두 구조물의 동적거동에는 거의 영향을 미치지 못한다.



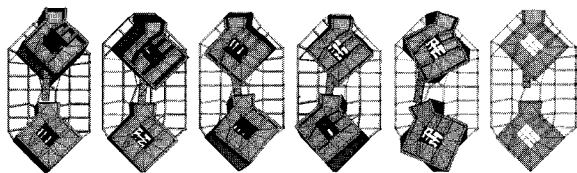
(a) 1차 (b) 2차 (c) 3차 (d) 4차 (e) 5차 (f) 6차
 <그림 12> 모델 A의 모드형상 및 고유진동주기



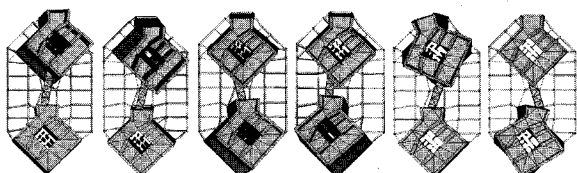
(a) 1차 (b) 2차 (c) 3차 (d) 4차 (e) 5차 (f) 6차
 <그림 13> 모델 B의 모드형상 및 고유진동주기



(a) 1차 (b) 2차 (c) 3차 (d) 4차 (e) 5차 (f) 6차
 <그림 14> 모델 C의 모드형상 및 고유진동주기



(a) 1차 (b) 2차 (c) 3차 (d) 4차 (e) 5차 (f) 6차
 <그림 15> 모델 D의 모드형상 및 고유진동주기



(a) 1차 (b) 2차 (c) 3차 (d) 4차 (e) 5차 (f) 6차
 <그림 16> 모델 E의 모드형상 및 고유진동주기

<표 5> 모델별 고유진동주기 (단위: 초)

모드	모델 A	모델 B	모델 C	모델 D	모델 E
1	6.10	5.77	6.10	5.91	6.10
2	5.36	4.93	5.36	5.10	5.36
3	4.55	4.07	4.55	4.33	4.55
4	3.88	2.24	3.88	3.86	3.88
5	2.65	1.61	2.65	2.39	2.65
6	2.28	1.30	2.28	2.02	2.28

6. 진동제어성능 검토

Sky-bridge 연결시스템을 대상구조물에 실제 적용하기 위해서는 건축적 요구사항 및 구조설계조건을 만족시키는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 절에서는 해석모델에 따른 sky-bridge의 축력 및 베어링의 변위와 반력을 비교하여 가장 적절한 연결시스템을 선정하였다. 해석모델별 sky-bridge 축력의 최대값을 <표 6>에 베어링의 변위와 반력의 최대값을 <표 7> 및 <표 8>에 나타내었다. 모델 A는 sky-bridge가 없는 모델이기 때문에 <표 6>에 나타내지 않았으며 <표 7> 및 <표 8>에서는 베어링을 사용하지 않은 모델 B의 결과가 제외되었다. 모델 B는 sky-bridge를 두 건물과 강점으로 연결하였기 때문에 두 건물의 상호 거동을 구속하므로 <표 6>에 나타난 바와 같이 모든 Load Case에 대해서 sky-bridge에서 매우 큰 축력이 발생하는 것을 알 수 있다. 모델 D 또한 4개의 LM 가이드를 사용하여 두 건물의 상호 거동을 구속하므로 Y방향 하중에 의한 지렛대 효과로 sky-bridge에서 매우 큰 축력이 발생하는 것을 알 수 있다. 모델 D의 경우에는 <표 8>에 나타난 바와 같이 베어링(LM 가이드)에서 Y방향으로 매우 큰 반력이 발생한다. 따라서 모델 B와 모델 D는 sky-bridge에 의한 두 건물의 구속효과로써 매우 큰 부재력 및 반력이 발생하게 되므로 대상 건물의 연결시스템으로는 부적절한 것으로 판단된다. 모델 E는 LRB만을 사용한 모델이므로 sky-bridge의 축력이나 베어링 반력이 크게 발생하지 않는다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 sky-bridge는 그 무게가 비교적 크지 않기 때문에 일반적인 구조물을 지반과 격리시키기 위하여 사용하고 있는 LRB를 사용한다면 LRB가 전단거동이 아

나라 휩거동을 일으킬 가능성이 존재하게 된다. 따라서 LM 가이드를 사용하여 sky-bridge와 두 건물의 연결부를 수직방향으로 긴밀하게 연결하는 것이 필요하다. 또한 전술한 바와 같이 건축적인 이유에서도 LM 가이드를 이용하여 sky-bridge 방향으로만 변위가 발생하도록 하는 것이 필요하다. <표 7>에 나타난 베어링의 변위를 보면 모든 경우에 20cm이하 이므로 실제로 적용하는데 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 이러한 모든 조건을 고려해 보았을 때 대상건물의 sky-bridge를 두 건물에 연결하는 연결시스템으로는 모델 C가 가장 적합한 것으로 판단된다.

<표 6> 모델별 sky-bridge의 최대축력 (단위: tonf)

Load Case	모델 B	모델 C	모델 D	모델 E
A1	233.0	1.4	104.1	1.4
A2	251.4	1.5	124.2	1.6
E1	296.4	1.4	88.6	1.6
E2	293.3	1.4	96.4	1.5
T1	333.1	1.2	111.1	1.3
T2	285.2	1.3	54.1	1.3

<표 7> 모델별 베어링 변위의 최대값 (단위: cm)

Load Case	X 방향			Y 방향		
	모델 C	모델 D	모델 E	모델 C	모델 D	모델 E
A1	17.3	16.5	17.1	4.0	0.0	6.0
A2	16.7	14.8	16.1	5.2	0.0	7.3
E1	10.8	16.8	11.9	3.4	0.0	6.4
E2	13.5	13.0	12.4	3.5	0.0	7.5
T1	8.7	8.1	8.3	4.7	0.0	7.6
T2	11.5	11.4	11.6	1.9	0.0	3.9

<표 8> 모델별 베어링 반력의 최대값 (단위: tonf)

Load Case	X 방향			Y 방향		
	모델 C	모델 D	모델 E	모델 C	모델 D	모델 E
A1	27.4	27.6	26.3	9.8	647.8	11.7
A2	22.2	207.	23.0	11.5	776.8	17.3
E1	24.7	23.1	22.2	9.0	541.9	26.0
E2	25.9	24.6	23.7	9.2	597.5	24.9
T1	22.0	21.3	20.7	9.9	690.7	17.8
T2	17.8	17.0	17.5	6.6	332.4	13.5

6가지의 지진하중에 대한 구조물 최상층의 최대 응답을 <표 9~11>에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 두 구조물과 sky-bridge를 강접으로 연결한 경

우에는 전체 구조물의 비정형성이 커지기 때문에 거의 모든 지진하중에 대하여 구조물의 응답이 증가되는 것을 알 수 있다. 모델 C와 모델 D는 sky-bridge가 1방향으로만 움직일 수 있도록 한 모델로서 두 모델 모두 sky-bridge가 없는 모델 A보다 구조물의 응답을 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 이때 모델 C가 모델 D보다 조금 더 우수한 제어효과를 보이고 LRB 모델 N1보다는 조금 더 크기가 큰 N2모델에서 응답감소효과가 더 좋은 것을 확인할 수 있다. 모델 E는 LM 가이드를 사용하지 않은 모델로 변위응답은 모델 C와 거의 비슷하고 가속도 응답은 전반적으로 조금 작은 것을 알 수 있다. 그러나 모델 E는 sky-bridge의 직각방향으로도 변위가 발생하므로 적합하지 않다. 5가지 모델 중에서 가장 합리적이고 우수한 제어성능을 나타내는 모델 C의 N2모델에 대하여 추가적인 점성감쇠기를 설치한 결과 변위뿐만 아니라 가속도응답에 대해서도 제어성능이 대폭 개선되는 것을 알 수 있다. 인접한 건물을 sky-bridge를 이용하여 제어를 하게되면 두 건물사이의 제어력이 sky-bridge를 통해서 상호 전달되는데 이때 제어력이 커지게 되면 sky-bridge에서 큰 응력이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다.

<표 9> 인공지진에 대한 최상층의 최대응답

Load Case	모델	LRB 모델	점성 감쇠기	변위 (cm)			가속도 (cm/s ²)			
				X방향	Y방향	SRSS	X방향	Y방향	SRSS	
A1	A	-	-	51.3	43.5	67.3	269.5	232.2	355.7	
				60.8	50.7	79.2	270.9	283.8	392.3	
	C	N2	c0	49.0	41.8	64.4	244.0	225.3	332.1	
			c0	49.0	41.6	64.3	227.4	252.2	339.6	
			c5	44.8	34.2	56.4	193.9	229.2	300.2	
			c10	41.6	28.9	50.7	176.2	211.7	275.4	
	D	N2	c0	57.1	43.1	71.5	248.2	220.5	332.0	
			c0	56.0	42.7	70.4	232.7	246.4	338.9	
	E	N2	c0	48.3	42.0	64.0	181.6	172.1	250.2	
			c0	48.9	41.8	64.3	205.1	218.7	299.8	
	A2	A	-	-	36.3	51.1	62.7	266.0	288.7	392.6
					44.6	67.4	80.8	273.5	325.3	425.0
C		N2	c0	35.7	50.9	62.2	249.5	228.2	338.1	
			c0	36.5	51.2	62.9	235.4	254.7	346.8	
			c5	34.5	46.3	57.7	220.1	231.4	319.4	
			c10	32.6	42.2	53.3	206.6	221.4	302.8	
D		N2	c0	42.9	54.1	69.0	248.6	230.3	338.9	
			c0	42.3	53.2	68.0	233.2	240.8	335.2	
E		N2	c0	35.9	50.6	62.0	174.1	220.3	280.8	
			c0	36.6	51.2	62.9	195.6	290.0	349.8	

<표 10> El Centro지진에 대한 최상층의 최대응답

Load Case	모델	LRB 모델	점성 감쇠 기	변위 (cm)			가속도 (cm/s ²)			
				X방향	Y방향	SRSS	X방향	Y방향	SRSS	
E1	A	-	-	37.0	37.8	52.9	484.5	372.0	610.8	
				34.7	40.2	53.1	296.1	341.7	452.1	
	C	N1	c0	36.0	37.4	51.9	350.7	277.7	447.3	
				c0	36.0	37.1	51.7	328.1	311.3	452.3
				c5	32.2	32.5	45.8	305.2	296.2	425.3
				c10	29.8	30.0	42.3	295.5	283.8	409.7
	D	N1	c0	35.4	37.9	51.9	351.1	277.5	447.5	
				N2	c0	35.4	37.8	51.8	328.3	310.1
	E	N1	c0	35.9	37.5	51.9	360.2	203.1	413.5	
				N2	c0	35.6	37.2	51.5	340.2	269.1
	E2	A	-	-	36.4	35.3	50.7	351.1	449.2	570.1
					42.1	40.1	58.1	366.3	372.8	522.6
C		N1	c0	32.5	33.9	47.0	272.4	338.5	434.5	
				c0	35.1	35.0	49.6	329.8	411.6	527.4
				c5	30.4	32.4	44.4	303.5	357.7	469.1
				c10	27.6	30.2	40.9	279.8	331.6	433.9
D		N1	c0	45.7	37.5	59.1	275.0	338.1	435.8	
				N2	c0	45.1	36.8	58.2	327.1	407.7
E		N1	c0	31.9	33.6	46.3	232.3	327.2	401.3	
				N2	c0	34.7	34.7	49.1	327.7	379.7

<표 11> Taft지진에 대한 최상층의 최대응답

Load Case	모델	LRB 모델	점성 감쇠 기	변위 (cm)			가속도 (cm/s ²)			
				X방향	Y방향	SRSS	X방향	Y방향	SRSS	
T1	A	-	-	22.0	46.5	51.4	330.5	283.3	435.3	
				28.3	58.8	65.3	319.5	379.7	496.2	
	C	N1	c0	20.9	46.9	51.3	265.5	262.4	373.3	
				c0	20.4	46.9	51.1	265.6	259.8	371.5
				c5	18.9	44.3	48.2	254.6	251.8	358.1
				c10	17.9	41.6	45.3	245.3	245.0	346.7
	D	N1	c0	20.7	54.6	58.4	268.4	263.1	375.8	
				N2	c0	20.6	54.4	58.2	265.5	260.5
	E	N1	c0	21.0	47.0	51.5	225.1	213.7	310.4	
				N2	c0	20.4	46.8	51.1	230.2	220.6
	T2	A	-	-	47.0	17.7	50.2	238.3	297.7	381.3
					46.4	38.9	60.5	284.9	372.8	469.2
C		N1	c0	46.5	17.2	49.6	237.9	330.7	407.4	
				c0	46.3	17.4	49.5	245.0	330.5	411.4
				c5	45.2	16.6	48.2	237.3	314.0	393.6
				c10	43.0	16.0	45.9	229.0	300.2	377.6
D		N1	c0	51.0	20.4	54.9	238.2	329.4	406.5	
				N2	c0	50.8	20.4	54.7	245.6	328.0
E		N1	c0	45.4	17.4	48.6	207.0	211.5	295.9	
				N2	c0	46.2	17.4	49.4	203.6	218.9

본 연구에서는 풍동실험을 통하여 계측된 풍하중 데이터를 이용하여 시간이력해석을 수행한 후 해석 모델별 최대응답을 비교하여 보았다. 앞에서 살펴본 바와 같이 대상 건물에는 모델 C의 연결시스템이 가장 바람직한 것으로 판단되므로 모델 C와 sky-bridge가 없는 모델인 모델 A에 대해서만 해석을 수행하였다. 풍하중에 의해서 거주자가 느끼는 불안감은 움직이는 방향에 관계없이 두 방향 응답 모두에 의하여 영향을 받기 때문에 각 방향의 응답을 SRSS하여 해석모델별로 <표 12>에 나타내었다. 표를 보면 풍하중에 의한 구조물의 응답역시 sky-bridge를 사용하여 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 풍하중이 가해지는 방향보다 풍직각 방향에 대한 제어효과가 더 우수한 것을 알 수 있다. 풍하중에 의하여 발생하는 sky-bridge의 축력 및 베어링의 변위와 반력은 지진하중에 의한 값보다 작기 때문에 연결시스템의 설계에는 영향을 미치지 못한다.

<표 12> 풍하중에 의한 최상층 최대응답

Load Case	모델	LRB 모델	점성 감쇠 기	변위 (cm)			가속도 (cm/s ²)		
				X 방향	Y 방향	SRSS	X 방향	Y 방향	SRSS
Wind-X	A	-	-	38.9	23.4	45.4	38.2	34.9	51.7
				N1	c0	38.9	22.3	44.8	38.5
	C	N2	c0	38.9	21.9	44.6	37.3	34.1	50.5
				c5	37.8	18.7	42.2	36.4	29.3
Wind-Y	A	-	-	20.6	37.7	43.0	28.8	35.0	45.3
				N1	c0	19.3	37.6	42.3	25.2
	C	N2	c0	19.0	37.6	42.1	25.4	34.5	42.8
				c5	16.1	35.6	39.1	20.7	34.1
E	N2	c0	13.9	34.9	37.6	17.6	33.8	38.1	

Sky-bridge로 연결된 고층 건물의 감쇠비 증가 정도를 정량적으로 알아보기 위하여 해석모델 A 및 C에 자유진동을 발생시킨 후 감쇠비를 계산하였다. 풍하중에 대한 RC조의 감쇠비는 사용성 향상에 대한 검토용으로 2%로 가정하였으며, sky-bridge가 설치되지 않은 모델 A의 감쇠비로 두었다. Sky-bridge가 설치된 모델 C의 감쇠비가 모델 A의 감쇠비보다 좋은 성능을 가진다면 sky-bridge의 설치가

구조물의 진동제어에 효과가 있다고 판단 할 수 있을 것이다. 감쇠비는 자유진동 상태에서 구조물의 동적응답 진폭비를 이용하여 계산하였다. 감쇠비의 계산 결과는 <표 13>에 나타난 바와 같이 모델 C의 경우 X방향은 2.0%에서 2.60%로 약 30% 증가하였으며, Y방향은 2.0%에서 2.61%로 역시 약 30% 증가하였다. 모델 C에 10tonf·sec/cm 용량의 점성 감쇠기를 추가한 모델 C-c10의 감쇠비를 같은 방법으로 계산하면 X방향은 4.35%로 118% 증가했고, Y방향은 4.47%로 123% 증가하였다. 위의 결과를 바탕으로 X와 Y방향 모두 모델 C의 감쇠비가 모델 A의 감쇠비에 비하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 점성 감쇠기를 추가한 모델 C-c10의 감쇠비는 별도의 감쇠기가 없는 모델 C의 감쇠비 보다 대폭 증가하는 것을 알 수 있다. 이로써 Sky-bridge의 설치는 인접하는 두 구조물의 연결에 있어 진동제어 효과를 가지는 것을 확인하였고, 적절한 감쇠기를 함께 설치 할 경우 진동제어 효과가 더욱 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

<표 13> 모델별 감쇠비

방향	X 방향			Y 방향		
	A	C	C	A	C	C
점성감쇠기	-	c0	c10	-	c0	c10
감쇠비(%)	2.00	2.61	4.47	2.00	2.60	4.35
증가율(%)	-	30	123	-	30	118

7. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 sky-bridge로 연결된 고층건물의 진동제어성능을 검토하여 보았다. 보다 실제적인 검토를 위하여 현재 건설 중인 49층 및 42층으로 이루어진 주상복합건물을 대상건물로 선정하였고 적절한 sky-bridge 연결시스템의 선정 및 성능검토를 수행하였다. 이를 위하여 지진하중 및 풍하중을 사용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행한 후 건물 및 sky-bridge에서 발생하는 응답을 검토하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조물의 응답은 sky-bridge를 강점으로 두 건물 사이에 연결하였을 때 구조물의 비정형성 때문에 가장 크게 발생하는 것을 확인할 수 있

었다. 또한 이 경우에는 sky-bridge에도 매우 큰 축력이 발생하게 되므로 sky-bridge를 두 건물에 연결하기 위해서는 반드시 적절한 제진 및 연결시스템을 사용하는 것이 필요하다.

- (2) 건축적인 요구에 의하여 sky-bridge와 건물의 연결부분에서 1방향으로의 이동만 허용하는 경우 LRB와 같은 2방향 베어링과 함께 LM 가이드를 사용할 수 있다. 이때 sky-bridge의 평면이 비정형이면 sky-bridge에 직각방향으로 가해지는 하중에 의하여 연결부 베어링 및 sky-bridge에서 과도한 응력이 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제는 LM 가이드를 sky-bridge 양단에서 1개씩만 사용함으로써 피할 수 있다.
- (3) 인접한 고층건물에 sky-bridge를 설치함으로써 지진응답 및 풍응답 모두 줄일 수 있었다. 일반적으로 sky-bridge 연결시스템의 강성이 건물의 강성에 비하여 매우 작기 때문에 sky-bridge를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 고유치해석 결과는 거의 비슷하다. 하지만 LRB 등에서 발생하는 에너지소산의 효과로 추가적인 진동제어장치 없이 sky-bridge 만으로도 고층건물의 동적응답을 효율적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다.
- (4) Sky-bridge의 무게를 고려해서 설계한 일반적인 용량의 LRB만으로 연결시스템을 구성하더라도 고층건물의 감쇠비를 약 30%가량 증가하였다. 또한 추가적인 감쇠장치를 연결시스템에 사용한다면 100%이상의 큰 감쇠비 증가를 얻을 수 있었다. 따라서 진동주기의 차이가 나는 고층건물에 sky-bridge를 도입함으로써 매우 효과적으로 진동제어성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.
- (5) Sky-bridge가 설치된 고층건물의 진동제어성능은 sky-bridge 방향의 하중 뿐만 아니라 sky-bridge 직각방향의 하중에 대해서도 효과적으로 개선될 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 안상경, 오정근, "Sky-Bridge를 이용한 초고층 건물의 진동제어", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol. 25, No. 1, 2005, pp. 35-38.
2. 김진구, 유진국, "Sky-bridge로 연결된 건물의 진동제어", 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 17, No. 2, 2004, pp. 203-213.
3. A.V. Bhaskararao and R.S. Jangid, Seismic analysis of structures connected with friction dampers, Engineering Structures, Vol. 28, 2006, pp. 690-703.
4. Jinkoo Kim, Jinguook Ryu and Lan Chung, Seismic performance of structures connected by viscoelastic dampers, Engineering Structures, Vol. 28, 2006, pp. 183-195.
5. Y.L. Xu, Q. He and J.M. Ko, Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation, Engineering Structures, Vol. 21, 1999, pp. 135-148.
6. R.E. Christenson, B.F. Spencer Jr., N. Hori and K. Seto, Coupled Building Control Using Acceleration Feedback, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 4-18.
7. R.E. Christenson, B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and K. Seto, Coupled Building Control Considering the Effects of Building/Connector Configuration, Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 6, 2006, pp. 853-863.
8. 옥승용, 김동석, 박관순, 고현무, "선형 점성 감쇠기가 장착된 인접구조물의 진동제어를 위한 유전자 알고리즘 기반 최적설계", 한국지진공학회 논문집, Vol. 11, No. 1.
9. 대한건축학회 구조설계기준 2005(KBC2005).

접수일자 : 2008년 6월 26일
심사완료일자 : 2008년 7월 23일