

전단벽 구조물의 풍응답 저감을 위한 LRB의 적용

Application of LRBs for Reduction of Wind-Induced Responses of Coupled Shear Wall Structures

박 용 구* 김 현 수** 고 현*** 김 민 균**** 이 동 근*****
Park, Yong-Koo Kim, Hyun-Su Ko, Hyun Kim, Min-Gyun Lee, Dong-Guen

요 약

일반적으로 전단벽은 횡력저항 요소로서 널리 이용되고 있다. 대부분의 전단벽 구조물은 통로의 목적으로 개구부를 필요로 하게 되고 전단벽들 사이가 슬래브나 연결보로 연결된 병렬전단벽의 형태를 띠게 된다. 본 연구에서는 병렬전단벽 구조물의 연결보 중앙부에 LRB(Lead Rubber Bearing)를 도입하였고 이 시스템의 풍응답 저감성능을 검토하였다. 제안된 방법의 효과를 살펴보기 위하여 20층 및 30층 예제구조물을 구성하였고 인공풍하중을 작성하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 제안된 방법이 풍하중을 받는 고층 병렬전단벽 구조물의 사용성 향상에 도움을 줄 수 있는지 평가하기 위하여 일본 진동성능평가기준을 적용하여 보았다. 해석결과 본 논문에서 제안하는 LRB를 사용하여 병렬전단벽을 연결하는 방식이 풍응답 제어성능 개선에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In general, shear walls are employed as lateral resistance system. Most of shear wall structures require openings in shear walls and thus shear walls are linked by floor slabs or coupling beams resulting in the coupled shear wall structures. In this study, an LRB (lead rubber bearing) was introduced in the middle of the coupling beam of the coupled shear wall structures and the wind-induced response reduction effect of this system was investigated. In order to evaluate the control performance of the proposed method, 20- and 30-story building structures were used as example structures and boundary nonlinear time history analyses have been performed using artificial wind excitation. Japanese vibration evaluation criteria was employed to evaluate whether the proposed system could improve the serviceability of the tall coupled shear wall structures under wind excitation. Based on analytical results, it has been shown that the proposed method that connects shear walls with LRBs can improve the wind-induced response control effect.

키워드 : 병렬전단벽, LRB, 진동제어, 사용성평가, 풍하중

Keywords : Coupled-shear wall, LRB, Vibration control, Evaluation of serviceability, Wind load

1. 서 론

근래에 건축물이 점차 고층화되는 추세에 따라 구조물이 유연해 저서 바람에 의한 진동문제가 크게 대두되고 있다. 이러한 고층건축물의 설계에 있어서 풍하중에 의한 구조물응답의 제어는 특히 최

근 급속히 고층화되고 있는 주거용 건축물에서 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이러한 고층건물의 풍응답을 저감시키기 위한 제어장치로는 TMD와 같이 관성력을 이용하는 방식이 많이 사용되고 있지만 진동제어장치가 상당히 큰 부피와 질량을 차지하고 이러한 제어장치의 설치를 위하여 설계상에 복잡함을 유발시키는 단점이 존재한다. 또 다른 방식의 제어장치로서 에너지 소산형 감쇠기의 경우 프레임 구조물에 가새를 설치하는 방식으로 많이 사용되고 있다. 이러한 방식은 구조물에 발생하는 전단변형을 이용하는 형태로써 효과가 좋지만 가새의 설치로 인한 통행의 제한 등 건축계획상의 어려

* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

** 교신저자, 선문대학교 건축학부 조교수

Tel: 031-530-2315 Fax: 031-530-2839

E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

*** (주)아이스트 제진팀, 공학박사

**** 삼성엔지니어링 발전기술팀 사원

***** 성균관대학교 건축공학과 교수

움이 있다. 또한 고층 전단벽 구조물에서는 전단변형보다 휨변형이 크게 발생하여 이러한 방식의 효율성이 떨어진다. 따라서, 본 논문에서는 구조물의 휨변형을 이용하여 에너지 소산형 감쇠기를 설치하는 방식을 제안한다.

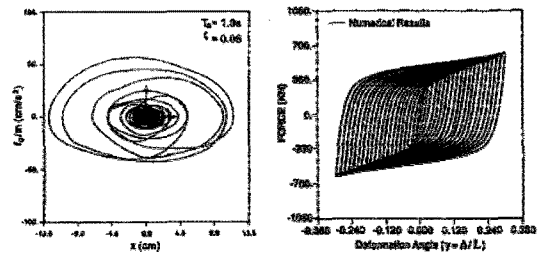
구조물의 휨변형을 이용하는 방식은 아웃리저에 감쇠기를 설치하는 방식¹⁾, 코어 벽체와 외부기둥사이에 감쇠기를 설치하는 방식²⁾, 그리고 전단벽 사이 연결보에 감쇠기를 설치하는 방식³⁾으로 나뉘어져 최근에 활발히 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 병렬전단벽의 연결보에 지진격리장치로 널리 이용되는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 설치하여 고층건물에서 발생하는 풍응답을 저감시킬 수 있는 방법을 제안하였다. LRB의 경우 다른 에너지 소산형 감쇠기에 비하여 원형 또는 사각단면을 가지는 등 다양한 연결보의 형태에 유기적으로 대응할 수 있는 장점이 있기 때문에 병렬전단벽 구조물에 감쇠장치를 적용하는 방법을 이용하는데 있어 효과적이다.

본 논문에서는 제안된 방법의 풍하중에 대한 진동제어 효과를 분석하기 위하여 20층 및 30층 전단벽식 아파트건물을 예제구조물로 선택하였다. 풍하중은 기존에 제시된 풍하중 스펙트럼과 위상각 함수를 바탕으로 역 FFT기법을 사용하여 인공풍하중을 작성하여 사용하였다. 이렇게 작성된 인공풍하중을 적용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였고 해석결과를 바탕으로 구조물의 수평진동에 대한 사용성 평가기준을 적용하여 진동제어 효과를 분석하였다.

2. 구조물의 변형형상에 따른 감쇠기의 설치방법

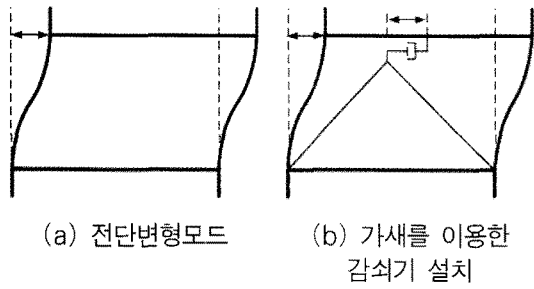
에너지소산을 이용한 감쇠기의 종류로는 점성감쇠기, 점탄성감쇠기, 마찰감쇠기 등 많은 종류가 있다. 이와 같은 감쇠기들은 모두 재료의 특징에 따라 <그림 1>과 같이 소성거동을 발생시킴으로써 진동 에너지를 소산시키는 장치이다.⁴⁾ 이와 같은 에너지 소산형 장치는 TMD 등과 같은 질량감쇠기와 달리

감쇠기 설치를 위한 큰 공간이 필요하지 않는다. 또한 하중의 다양한 진동수 성분에 영향을 받지 않으므로 다양한 주파수성분을 가진 풍하중 및 지진에 큰 효과를 발휘 할 수 있다. 따라서 고층건물의 풍진동 제어목적 뿐만 아니라 지진에 의한 피해를 최소화시키기 위한 목적으로도 널리 이용되고 있다. 특히 저층건물과 같은 단주기 구조물은 지진하중에 의한 피해가 더욱 크게 작용하기 때문에 에너지 소산형 감쇠기를 설치하여 지진에 의한 입력에너지를 상당수 소산시킴으로써 주구조물의 피해를 최소화시킬 수 있는 장점이 있다.



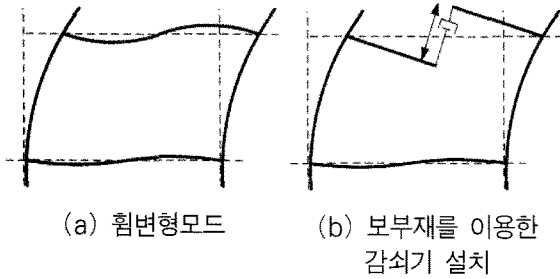
(a) 점탄성감쇠기의 이력거동 (b) Plate metallic damper의 이력거동
<그림 1> 에너지소산형 감쇠기별 이력거동

이러한 에너지 소산형 감쇠기의 설치방법은 보통 감쇠기가 충분한 변형을 일으켜서 에너지소산능력을 최대로 이끌어 낼 수 있도록 구조물내에서 상대변위가 가장 크게 발생하는 두 점 사이를 연결하게 된다. 따라서 일반인적 프레임구조물에서는 변형형상에서 전단변형의 영향이 크게 나타나므로 <그림 2>와 같이 구조물에서 발생하는 층간변위 만큼 상대변형을 일으킬 수 있도록 가새를 설치하여 감쇠기를 적용하는 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나, 박지형 등의 연구사례⁵⁾를 살펴보면 건물의 횡방향 거동은 전단변형모드와 휨변형모드의 조합으로 표현이 가능한데 휨변형모드의 영향이 클수록 가새를 이용한 감쇠기의 상대변위가 작아지게 된다. 특히 고층건물일수록 이러한 영향이 커져서 가새를 이용한 감쇠기 설치방법의 효율성이 떨어지게 되고, 전단벽식 구조물의 경우 전단변형모드에 비하여 휨변형모드가 지배적이게 되므로 이러한 방식의 감쇠기 설치방법에는 한계가 있다.



(a) 전단변형모드 (b) 가새를 이용한 감쇠기 설치
 <그림 2> 전단변형모드를 이용한 감쇠기 설치방법

따라서 최근에는 <그림 3>과 같이 구조물의 휨변형모드를 효과적으로 이용할 수 있는 감쇠기 설치 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 휨변형모드를 이용하는 경우에는 가새와 같은 추가적인 부재의 설치 없이 구조물의 수평부재 사이에 감쇠기를 설치하여 상대변위를 이용할 수 있다. 또한 가새의 설치가 불필요하게 되어 공간상의 제약도 받지 않아 효율적인 방법이다.



(a) 휨변형모드 (b) 보부재를 이용한 감쇠기 설치
 <그림 3> 휨변형모드를 이용한 감쇠기 설치방법

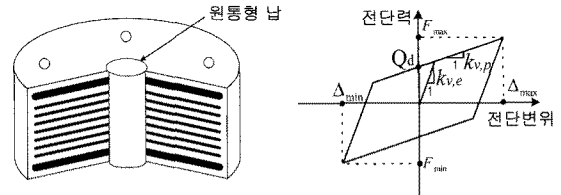
최근 Smith 등¹⁾은 아웃리거에 점성감쇠기를 설치하는 방식을 제안하여 아웃리거 구조의 효율성을 향상시켰고, 안상경 등²⁾은 코어전단벽과 외부기둥 사이를 연결하는 보 부재에 점탄성감쇠기를 설치하는 방식을 제안하여 풍하중에 의한 진동을 제어하였다. 민경원 등³⁾은 인방보에 마찰감쇠기를 설치하여 저층구조물의 내진성능을 크게 향상시키는 방법에 대한 연구를 수행하는 등 최근 휨변형모드를 이용하는 방식이 각광받고 있다. 그러나 아직 휨변형모드를 효과적으로 사용할 수 있는 감쇠기의 설계 등 충분한 연구가 이루어지지 않은 상태이다.

3. 병렬전단벽 시스템의 진동성능

개선을 위한 LRB의 활용

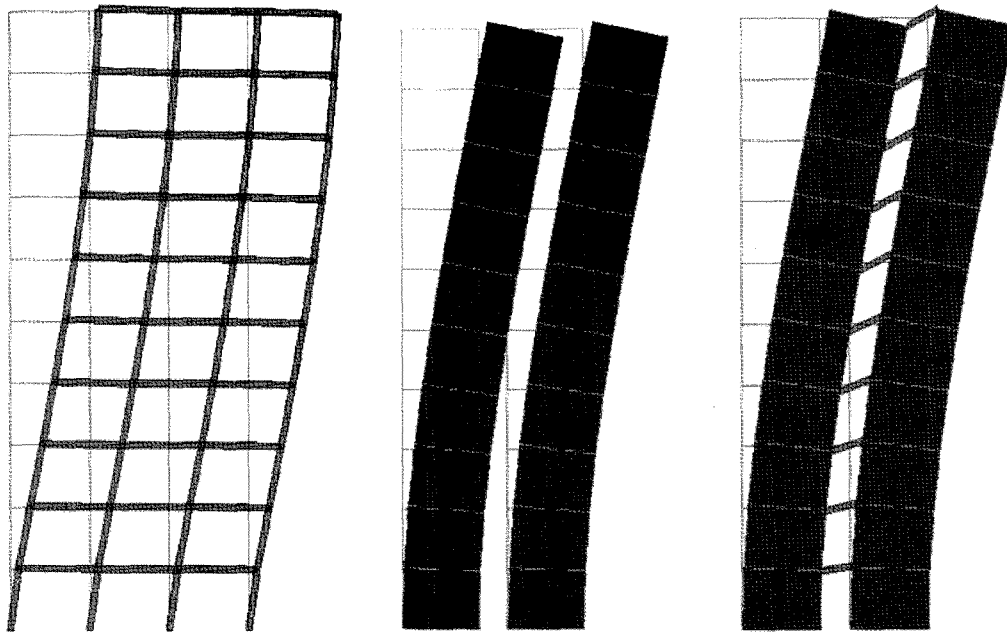
3.1 LRB의 구성 및 특징

현재 면진장치로서 널리 사용되고 있는 LRB(lead rubber bearing)는 1975년 뉴질랜드의 W. H. Robinson에 의하여 최초로 만들어 졌다⁴⁾. 이 베어링의 성공은 에너지 소산과 밀면분리를 동시에 쉽게 실현할 수 있다는 데 있다. 전형적인 LRB를 <그림 4(a)>에서 나타내었다. 이 베어링은 적층고무 베어링의 중앙에 원통형의 납을 삽입한 것이다. 철판들과 외부 수직 하중이 원통형 납에 구속력(confinement)을 제공한다. <그림 4(b)>는 납-고무 베어링의 일반적인 수평방향 힘-변위 관계를 보여준다. 여기서, F_{max} 와 F_{min} 은 최대와 최소하중의 크기이고, Δ_{max} 와 Δ_{min} 은 최대변위와 최소변위를 나타내며, Q_d 는 변위가 0일 때의 전단강성이다.



(a) LRB(lead rubber bearing) (b) 수평방향 힘-변위 특성
 <그림 4> LRB의 단면과 수평방향 힘-변위 특성

LRB는 약한 전단력에서 납이 항복할 때까지는 높은 초기 전단강성 $k_{v,e}$ 를 가지고 탄성적으로 작용한다. 납이 항복한 후에는 베어링이 감소된 전단강성 $k_{v,p}$ 를 가지고 이력거동에 의하여 에너지를 소산시켜 감쇠력을 부여한다. 감쇠의 증가는 지진 등에 대하여 에너지 소산능력을 높이고 구조물의 동적응답을 감쇠시키는 역할을 한다. 따라서 LRB는 내부에 삽입된 납의 이력거동으로도 감쇠능력을 가지고 있지만 더 큰 감쇠능력을 추가하기 위하여 추가적인 감쇠장치를 설치할 수도 있다. 또한, LRB의 특징 중에 하나로 내부에 삽입되는 납은 변형시에 결정구조를 바꾸는 물질(crystalline material)로 변형이 그치면 거의 원래 결정구조로 복원되는 특성이 있다. 모든 금속은 변형된 금속분



(a) 프레임 구조

(b) 전단벽 구조

(c) 병렬전단벽 구조

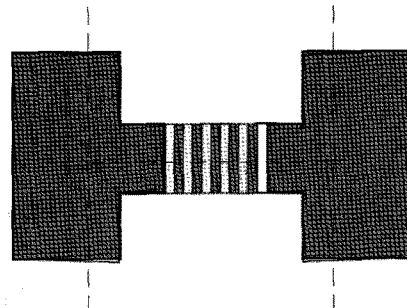
〈그림 5〉 구조형식별 거동특징

자에 열을 가함으로써 원래의 분자구조로 되돌아가려는 특성을 갖고 있으며, 변형된 분자의 50%가 1시간 이내에 원래의 분자구조로 되돌아가는 온도를 금속의 재결정화 온도라고 한다. 다른 금속은 이러한 재결정화 온도가 매우 높는데 반하여 납은 상온인 20℃에서 원래의 분자구조로 재결정화 되게 된다. 이러한 이유 때문에 많은 반복변형에도 납은 우수한 이력감쇠특성을 나타낸다.

3.2 병렬 전단벽 구조물에서 LRB의 활용

횡력저항시스템으로 효과적으로 사용되는 전단벽식 구조는 휨거동 또는 전단거동에 의하여 횡력에 저항하게 된다. 그러나 일반적으로 폭, 높이비가 3 이상이 되는 경우 전단벽은 주로 휨변형모드가 지배적이게 된다<그림 5(b)>. 이런 전단벽의 특성은 <그림 5(c)>에서 확인할 수 있듯이 병렬전단벽 구조에서도 똑같이 작용한다. 따라서 <그림 5(a)>에 나타난 전단변형모드가 지배적인 프레임구조와는 다르게 전단벽구조에서는 휨변형모드가 지배적이므로 감쇠장치를 설치하고자 한다면 <그림 3>과 같이 휨변형모드를 이용한 감쇠장치 설치방법을 사용해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 <그림 5(c)>에 나타난

병렬전단벽 구조물의 연결보 중앙에 LRB를 설치하는 방법을 제안하였다. 일반적인 면진장치로서 활용되는 LRB는 수평방향으로 전단변형이 발생하게 되지만 본 연구에서는 <그림 6>과 같이 LRB를 연결보 중앙에 설치하게 되므로 수직방향으로 전단변형이 발생하게 된다.



〈그림 6〉 병렬 전단벽의 연결보에 설치된 LRB

이와 같이 제안된 LRB설치방법을 사용하면 병렬 전단벽 구조물의 휨변형모드를 이용함으로써 설치된 LRB의 이력거동에 의한 감쇠효과에 의하여 전체 구조물의 동적응답을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 특히 건축물이 고층화 되는 추세에서 가속도 응답의 저감은 구조물의 사용성능을 개선하는데 있어 큰 효과가 있을 것이다. 둘째로,

병렬전단벽에서 연결보 설계시 발생하는 과도한 부재력을 감소시킬 수 있을 것이다. 연결보에 LRB를 설치함으로써 연결보에 생기는 응력집중을 피하게 되므로 연결보 설계시에 복잡한 철근배근과 같은 어려움이 사라지게 된다. 물론 연결보의 강성저하로 병렬전단벽 구조물의 횡력저항성능이 떨어질 수 있지만 LRB의 감쇠 능력으로 충분히 횡하중에 대한 저항성능을 확보할 수 있다. 마지막으로 병렬전단벽에서 건축계획상의 목적으로 확보하고자 하는 연결보의 크기를 쉽게 만족할 수 있다. 계획상 상당한 높이를 가지는 연결보를 설계하고자 할 때, 기존의 설계방법으로는 한계가 있었다. 제안된 LRB설치방법은 부재응력을 효과적으로 줄여주게 되어 이러한 문제를 쉽게 극복할 수 있다. 따라서 병렬전단벽 구조물의 연결보에 LRB를 설치하는 방법이 여러 가지 면에서 이점을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 LRB설치 효과를 검토하기 위하여 다음 절에서 예제구조물을 바탕으로 시간이력해석을 수행하여 보았다.

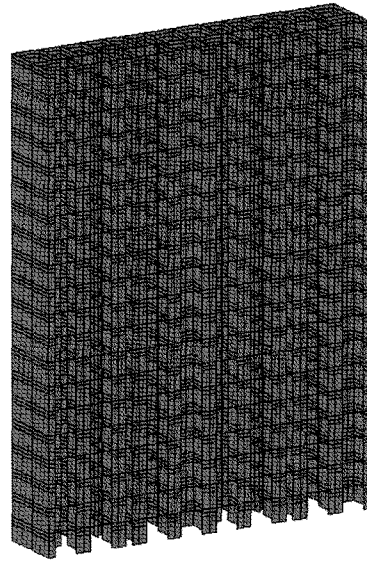
4. 예제구조물 및 풍하중

4.1 병렬전단벽 예제구조물

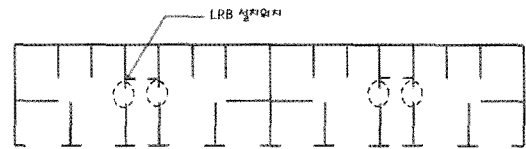
예제구조물은 <그림 7>과 같은 전단벽식 아파트 구조물을 선택하였다. 예제구조물은 두께 18cm인 세대내 벽체를 제외한 모든 벽체를 두께 20cm로 설계하였고, 층고는 3m로 하였다. 예제구조물은 두 벽체간의 연결방식에 따라서 일반 연결보를 사용한 모델(RC Beam), 연결보 없이 강막가정으로만 전단벽이 연결된 모델(RD), 그리고 연결보 사이에 LRB가 설치된 모델(LRB)로 구성하였다. 층수는 20층과 30층으로 하였다. 수직하중은 구조물의 용도를 주택으로 가정하여 2kN/m^2 의 활하중을 사용하였고, 고정하중은 5kN/m^2 으로 가정하여 적용하였다.

<그림 7(b)>의 평면상에서 점선으로 표시된 부분이 LRB가 설치되는 병렬전단벽 부분으로 횡력에 상대적으로 불리한 단변방향에 대해서만 적용하도록 하였다. 해석을 수행할 때도 LRB가 적용되는 단변방향으로만 하중을 가하여 응답을 검토하였다. 또한, RC 보로 연결된 경우에는 벽체의 두께와 통로

의 높이를 고려하여 $20\text{cm} \times 90\text{cm}$ 단면을 가지는 RC 보를 설계하였다.



(a) 예제구조물 해석모델



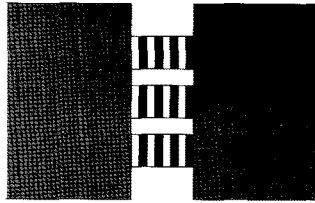
(b) 예제구조물 평면

<그림 7> 전단벽식 예제구조물

본 연구에서 사용한 LRB의 특성치는 <표 1>에 나타내었고 이러한 특성치를 가지는 LRB를 <그림 8>에 나타낸 바와 같이 3개를 사용하여 전단벽 사이를 연결하였다.

<표 1> 해석모델에 적용된 LRB의 특성

	초기 수평강성 (kN/cm)	항복하중 (kN)	항복 후 수평강성 (kN/cm)	등가강성 (kN/cm)
LRB	163	17.3	16.3	12.6



〈그림 8〉 병렬전단벽 연결부재에 설치된 LRB(3개설치)

4.2 인공풍하중

바람에 대한 건축물의 진동특성을 파악하기 위한 가장 좋은 방법은 풍동실험을 수행하는 방법이다. 풍동실험을 수행하여 계측한 풍하중을 바탕으로 시간이력해석 또는 스펙트럼 해석을 수행하면 주변 지형이나 건물의 영향까지 고려된 건축물의 진동특성을 효과적이고 정확하게 분석할 수 있다. 그러나 풍동실험은 실험을 위한 모형 제작 및 실험장비 대역을 위한 비용과 노력이 상당히 많이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 서로 다른 구조시스템을 사용하였을 경우의 동적응답을 상대적으로 비교하고자 하기 때문에 바람에 의한 주변 지형이나 건물의 영향까지 고려하여 예제구조물의 실제 거동을 표현할 필요는 없다. 따라서 과도한 비용과 노력이 필요한 풍동실험을 수행하지 않고 간단히 바람의 특성을 잘 표현할 수 있는 인공풍하중을 작성하여 시간이력해석을 수행하였다⁷⁻¹⁰⁾.

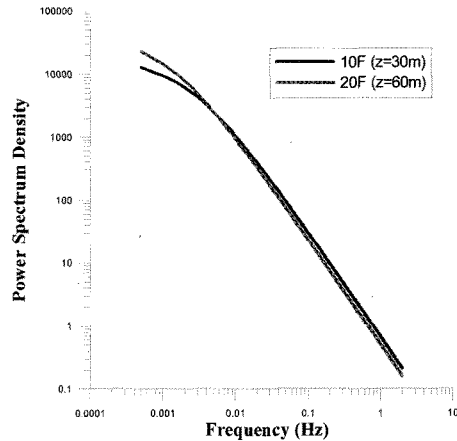
인공풍하중을 작성하기 위하여 우선 각 층의 평균풍속 및 평균풍하중을 각각 식 (1)과 (2)를 통하여 구하였다.

$$u_i = u_r \left(\frac{z_i}{10}\right)^\alpha \tag{1}$$

$$w_i = \frac{1}{2} \rho A_i C_D u_i^2 \tag{2}$$

식 (1)에서 u_i , z_i 그리고, u_r 은 각각 i 번째 층의 평균속도, 층의 높이 그리고, 지상 10층에서의 기준 풍속(15m/sec)이고 α 는 0.4를 적용하였다. 식 (2)에서 ρ , A_i , C_D 는 각각 공기밀도(12.5N/m³), i 번째 층의 풍하중에 노출된 면적, 그리고 드래그 상수로

서 1.2를 사용하였다. 인공풍하중작성을 위한 풍속 스펙트럼은 잘 알려진 식 (3)의 Kaimal 스펙트럼을 사용하였으며 풍방향성분만을 고려하여 각층에 대한 풍속스펙트럼을 작성하였다.



〈그림 9〉 Kaimal's power spectrum density

$$\frac{nS_u(n)}{U^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \tag{3}$$

여기서, f 와 U 는 다음과 같다.

$$f = \frac{nz}{U(z)}, \quad U = \frac{KU(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{4}$$

식 (4)에서 z 는 해당하는 층의 높이(m)를 나타내고, z_0 는 ground roughness로서 1m로 하였다. K 값으로는 0.4를 적용하였으며 $U(z)$ 는 높이 z 에서의 평균풍속으로 앞서 구한 값을 적용하였다.

Kaimal의 풍속스펙트럼을 바탕으로 한 각 층의 풍속스펙트럼만으로는 자연풍속을 구현하기에 충분하지 못하다. 따라서 각 층간의 상호관계를 고려하기 위해 식 (5)를 사용하여 비대각 스펙트럼을 작성하였다.

$$S_{jm}(w) = \sqrt{S_{jj}(w)S_{mm}(w)} Coh_{jm}(w) \tag{5}$$

여기서, $S_{jj}(w)$ 와 $S_{mm}(w)$ 은 j 및 m 층의 풍속스

펙트럼이고 $S_{jm}(w)$ 은 j 층과 m 층의 상호관계를 고려한 풍속의 비대각 스펙트럼이 된다. 식 (5)에서 층간의 상호관계를 고려하기 위한 함수가 $Coh_{jm}(w)$ (coherence function)으로써 식 (6)과 같으며 decay factor로는 15를 적용하였다.

$$Coh_{jm}(w) = \exp\left(-\lambda \frac{\omega r_{jm}}{2\pi U(z)}\right) \quad (6)$$

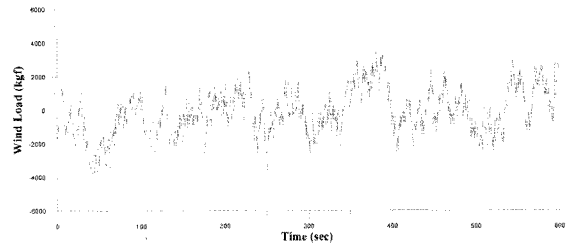
이렇게 생성된 풍속 스펙트럼을 바탕으로 임의의 풍속 시간이력을 생성하기 위해서는 역FFT(inverse fast fourier transform)과정과 각층에 대한 위상각 함수가 필요하다. 따라서 앞서 생성한 풍속스펙트럼을 Cholesky 분해기법을 사용하여 하삼각행렬을 작성하고 각 층에 대하여 정규분포를 따르는 위상각 함수를 작성한 후에 식 (8)과 같은 FFT함수(X_p)를 작성하고 역FFT를 통하여 각 층의 풍속시간이력(x_p)을 작성하였다.

$$x_p(n\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N X_p(k\Delta f) \exp(j \frac{2\pi kn}{N}) \quad (7)$$

$$X_p(k\Delta f) = \sqrt{2f_c N} \sum_{i=0}^p H_{\pi}(k\Delta f) \zeta_{ik} \quad (8)$$

여기서, H_{π} 는 Cholesky 분해기법을 통하여 작성된 하삼각행렬이며 ζ_{ik} 는 위상각으로 평균이 0이고 분산이 0.5인 가우스 복소난수(complex gaussian random numbers)이며 $\Delta t = 1/2f_c$ 로 f_c 는 나이퀴스트 진동수(nyquist frequency)이다.

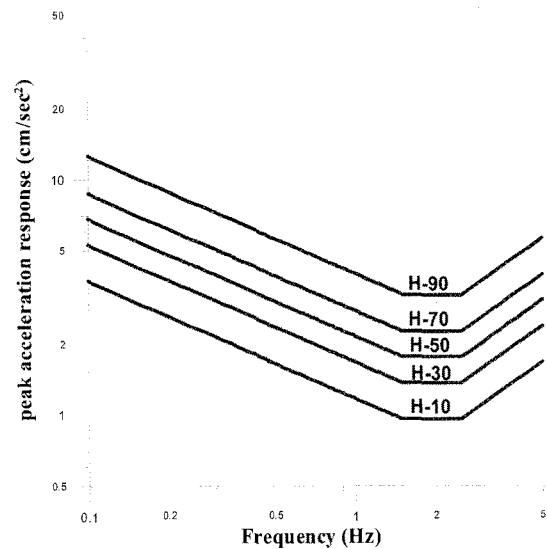
이러한 이론을 바탕으로 MATLAB의 m-file 프로그램을 작성하였고 각 층에 대한 풍하중의 시간이력을 생성하여 <그림 10>에 나타내었다. 이렇게 작성된 풍하중을 각 층에 강막가정을 적용한 예제구조물의 단변방향 질량중심에 가하여 시간이력해석을 수행하였다.



<그림 10> 인공풍하중 시간이력(20층)

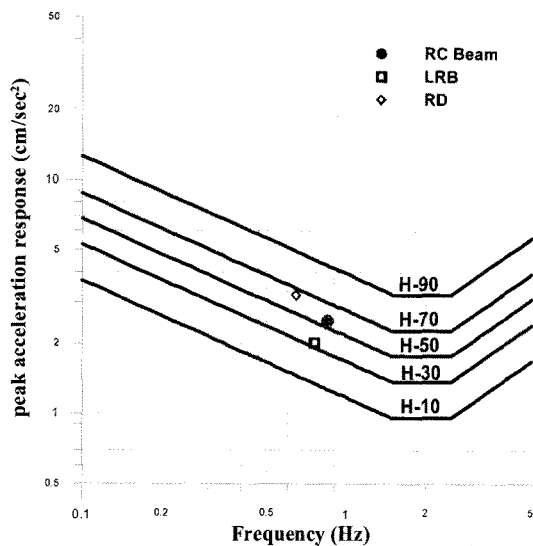
4.3 사용성 평가기준

본 논문에서는 풍하중에 의한 사용성 평가기준으로 일본기준(AIJES-V003-2004)를 적용하였다. 일본 기준은 강풍으로 인하여 건축물에 발생하는 수평진동을 평가하는 경우에 적용하도록 하고 있다. 바람에 의한 진동에 관한 사용성 평가는 목표성능을 설정하여 대상건축물의 병진진동 고유진동수와 재현기간 1년의 최대응답가속도를 조합하여 평가하도록 하고 있다. 여기서 대상으로 하는 진동수의 범위는 저층부터 고층까지 건축물의 고유진동수를 포함하여 0.1Hz ~ 5Hz까지로 하고 있다.

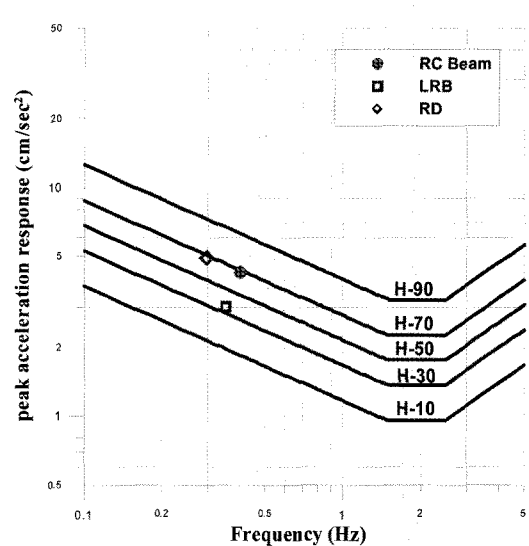


<그림 11> 수평진동에 관한 성능평가곡선 (AIJES-V001-2004)

일본기준에서 바람에 의한 수평진동은 <그림 11>의 성능평가곡선에 기초하여 평가한다. 각각 목표성능 곡선에서 나타나는 H-90과 같은 용어는 거주자들 중에서 바람에 의하여 불안감을 느끼는 사람의 비율을 나타내고 있다. 예를 들어 H-90의 경우 전체



<그림 12> 20층 예제구조물의 사용성평가



<그림 13> 30층 예제구조물의 사용성평가

거주자들의 90%가 진동에 의한 불안감을 느낀다는 의미이고, H-10의 경우 전체 거주자들의 10%가 진동에 의한 불안감을 느낀다는 의미이다.

5. LRB로 연결된 병렬전단벽 시스템의 풍응답 평가

본 연구에서는 풍속 스펙트럼을 바탕으로 생성한 인공풍하중을 앞서 설명한 예제구조물에 적용하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석프로그램으로는 MIDAS/Gen을 사용하였으며 LRB 해석모델에서만 비선형 거동이 고려되고 나머지 모든 요소에 대해서는 선형탄성해석이 수행된다. 20층 및 30층 예제구조물에 대하여 RC Beam 모델, RD 모델 그리고 LRB 모델별 최대치 풍응답을 구하였고 이를 수평진동에 대한 일본의 사용성 평가기준을 토대로 검토하여 보았다.

<그림 11>에 나타난 진동성능평가곡선에 각 모델별 단변방향 고유진동수와 인공풍하중을 사용했을 때 최상층 가속도 응답의 최대값을 <그림 12>와 <그림 13>에 나타내었다. 해석결과, 20층 예제구조물은 <그림 12>에 나타난 바와 같이 RC Beam으로 연결된 모델의 경우 H-50수준의 진동성능을 보이고 있지만 LRB가 적용된 모델의 경우 H-30수준의 진동성능을 나타내고 있다. RD모델의 경우 H-70수준

에 가까운 응답을 나타내어 병렬전단벽 구조물에서 벽체사이에 연결보로 연결되지 않았을 때 가장 불리한 진동응답을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이를 통해서 병렬전단벽을 일반적인 철근콘크리트 연결보로 연결할 경우에 슬래브로만 연결되어 있는 경우보다 풍하중에 대한 사용성 평가에서 더 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 LRB를 사용하여 병렬전단벽을 연결한 경우에는 연결보를 사용한 모델보다 한 단계 더 우수한 사용성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

<그림 13>에 나타난 30층 예제구조물의 경우를 보면 RD 모델과 RC Beam 모델이 거의 비슷하게 H-70수준의 진동성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 하지만 LRB 모델의 경우에는 H-30수준으로 매우 뛰어난 진동성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 20층 예제구조물보다 30층 예제구조물에서 LRB 모델이 더 뛰어난 사용성 개선효과를 나타내는 이유는 전단벽구조물이 고층이 될수록 휨변형이 더 커지므로 LRB에 의한 에너지소산효과가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 예제해석 결과를 통해서 병렬전단벽 구조물에 LRB를 적용함으로써 건물의 사용성능개선에 상당한 효과가 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 연결보 없이 두 벽체가 슬래브로만 연결된 경우는 가속도응답에서 불리한 경향을 보이고 진동성능이 매우 떨어지는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 풍하중을 받는 병렬전단벽 구조물의 진동제어를 위하여 연결보에 LRB를 설치하는 방법을 제안하였고 제안된 방법의 진동제어 효과를 살펴보았다. 이를 위하여 20층 및 30층의 예제구조물의 구성하였고 진동성능평가를 위하여 인공풍하중을 작성하여 경계비선형 시간이력해석을 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 병렬전단벽 구조물에 풍하중이 작용하는 경우에 전단벽사이에 연결보가 설치된 구조물이 슬래브로만 연결된 구조물에 비하여 더 우수한 풍응답 저감효과를 나타내는 것을 알 수 있다.
- (2) 병렬전단벽의 연결보 사이에 LRB를 설치한 모델의 경우 연결보만 사용된 구조물에 비하여 매우 우수한 풍응답제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 즉, 연결보만을 사용하여 단순히 강성만을 증가시키는 경우보다 LRB를 적용하여 감쇠능력을 증가시키는 것이 고층건물의 풍응답 제어에서 더욱 효과적이라고 판단된다.
- (3) LRB를 사용한 병렬전단벽 구조물의 풍응답 제어성능은 구조물이 고층화 될수록 더욱 향상된다. 이것은 전단벽구조물이 고층화 될수록 횡변형의 양상이 더욱 증가해서 LRB에 의한 에너지 소산효과가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) RC Beam으로 연결된 경우 실제로는 과도한 응력집중으로 인한 균열 등에 의하여 연결보의 강성이 상당히 떨어지게 된다. 따라서 RC 연결보의 강성저하를 고려하는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0010426)을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Rob, J. Smith and Michael R. Willford (2007), "The damped outrigger concept for tall buildings", Struct. Design Tall Spec. Build, Vol.16, pp.501-517.
2. Sang-Kyung Ahn, Kyung-Won Min, Ji-Hun Park, Sang-Hyun Lee, Dong-Guen Lee, Jung-Keun Oh, Ki-Soo Kim, Sung-Kyung Lee (2008), "Practical issues and solutions on installation of viscoelastic dampers in a 46-story reinforced concrete building structure", Struct. Design Tall Spec. Build, Vol.17, pp.231-243.
3. Hee-San Chung, Byoung-Wook Moon, Sung-Kyung Lee, Ji-Hun Park, Kyung-Won Min (2009), "Seismic performance of friction dampers using flexure of rc shear wall system", Struct. Design Tall Spec. Build, Vol.18, pp.807-822.
4. T.T. Soong, G.F. Dargush (1997), Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering, John Wiley & Sons.
5. 박지형, 김태호, 김옥중, 이도범 (2008), "제진장치를 적용한 초고층 주거형 건축물의 횡변위 제어 성능 평가", 한국전산구조공학회 논문집 제21권 제3호, pp.265-273.
6. 현대건설주식회사 (1996), LRB방식 면진시스템 개발.
7. L.E. Witting, and A.K. Sinha (1975), "Simulation of multicorrelated random processes using the FFT algorithm", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.58, No.3, pp.630-634.
8. C. Dyrbye and S.O. Hansen (1997), Wind Loads on Structures.
9. Yongle Li, Haili Liao, Shizhong Qiang (2004), "Simplifying the simulation of stochastic wind velocity fields for long cable-stayed bridges", Computer and Structures, Vol. 82, pp.1591-1598.

10. 김태호, 김현수 (2008), “최상층면진시스템을 활용한 고층건물의 진동제어”, 한국공간구조공학 회지, 제8권, 제5호, pp.75-82.

- ▶ 접수일자 : 2010년 8월 5일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 11월 3일
- ▶ 게재 확정일자 : 2011년 2월 16일