

고층 벽식 아파트의 지진해석을 위한 등가모델

An equivalent model for the seismic analysis of high-rise shear wall apartments

김태완¹⁾ · 박용구²⁾ · 김현정³⁾ · 이동근⁴⁾

Kim, Tae-Wan · Park, Yong-Koo · Kim, Hyun-Jung · Lee, Dong-Guen

국문 요약 >> 현재 국내에서도 내진설계에 대한 요구 및 관심이 증가하여 지진해석의 필요성이 증대되고 있다. 특히 벽식 아파트는 주거용으로 가장 많이 건설되고 있어 내진설계를 위한 지진해석이 활발히 수행되고 있다. 지진해석을 위해 벽식 아파트 전체를 유한요소로 세분화하여 모형화하는 것은 시간 및 노력에 있어 효율적이지 못하다. 따라서 자유도를 감소시키면서 실제 구조물의 동적 거동을 정확히 표현할 수 있는 등가모델이 필요하다. 본 연구에서는 구조물의 변형형상과 밀접한 관계가 있는 유효질량계수를 이용하여 간편하게 사용할 수 있는 등가모델 구성방법을 제안하였다. 이 등가모델은 기둥과 보로 구성된 골조구조물을 사용하여 벽식 구조물을 등가의 모델로 치환하였다. 등가모델은 어떤 상용프로그램에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 해석시간 단축이 가능하여 단시간 다양한 지진에 대한 해석이 필요한 경우 매우 유용하게 사용될 수 있다. 또한 등가모델은 바닥슬래브를 모형화 할 수 있어 실제 벽식 아파트의 거동을 잘 표현할 수 있다. 더욱이 등가모델은 구조물의 비대칭성을 표현할 수 있어 매우 우수하다.

주요어 지진해석, 등가모델, 모드형상, 유효질량, 벽식 아파트

ABSTRACT >> Currently in the country, the necessity of seismic analyses is increasing due to the increase of demand and interest in seismic design. Especially, shear wall apartments are constructed mostly for a residential building so seismic analyses for the apartment are actively executed. For the seismic analysis of the shear wall apartment, it may be not efficient in time and effort to model the entire structure by a finite element mesh. Therefore, an equivalent model is needed to simulate the dynamic behavior of the structure by decreasing the number of degrees of freedom. In this study, a method to form an equivalent model that is simple and easy to use was proposed utilizing effective mass coefficient that is highly correlated to mode shape of the structure. This equivalent model was obtained by replacing a shear wall structure with an equivalent frame structure having beams and columns. This model can be used very effectively when excessive seismic analyses are necessary in a short period because it can be operated in any commercial program and reduce the analysis time. Also, it can model floor slabs so it can represent the actual behavior of shear wall apartments. Furthermore, it is very excellent since it can represent the asymmetry of the structure.

Key words Seismic analysis, equivalent model, mode shape, effective mass, shear wall apartment

1. 서론

국내에서 많이 건설되고 있는 벽식 아파트는 일반적으로 횡하중이 전달되는 경로에서 바닥슬래브는 큰 비중을 차지하고 특히 구조물이 전단벽식 시스템 또는 비정형 구조일 경우에는 바닥슬래브의 영향이 커지게 된다. 일반적인 벽식

아파트의 경우 해석모델에 전단벽 뿐만 아니라 바닥슬래브를 함께 모형화하여 해석할 경우 절점과 요소의 증가로 인해 많은 시간과 노력이 요구되므로 바닥슬래브를 강막 가정을 이용하여 모형화한 후 해석을 수행하게 된다. 하지만 실제로는 바닥슬래브의 면외 휨강성이 존재하므로 강막 가정을 사용하면 횡하중 분배에 있어 실제와 차이가 발생한다. 바닥슬래브 면외 강성의 제외로 벽체의 하중부담이 증가하게 되어 벽체의 휨모멘트 및 전단력이 과도하게 발생하게 되고, 실제보다 전체 구조물의 강성이 저하되어 층간변위 또한 과도하게 계산되는 결과가 발생한다. 실제로는 슬래브의 면외 강성이 횡하중을 일정 부분 부담함으로써 벽체가 부담하는 하중은 면외 강성을 고려하지 않았을 때보다 감소하고 층간변위 또한 감소한다. 따라서 전단벽과 기둥의 부재력 등을

¹⁾ 정회원·창·민우 구조 컨설턴트 실장
(대표저자: kmbigdol@gmail.com)

²⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과 대학원 석사과정

³⁾ (주) E & C 사원

⁴⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 5. 7 / 심사종료일 : 2007. 6. 25)

정확하게 평가하기 위해서는 바닥슬래브의 면내 강성과 면외 강성을 모두 고려할 필요가 있다.

바닥슬래브의 면외 강성을 고려한 벽식 아파트의 해석모델은 앞서 지적한 바와 같이 해석 및 결과 분석에 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 일반적으로 절점과 요소를 축소한 등가모델을 사용하여 모형화하고 해석을 수행한다. 이러한 경우에 해석에 사용되는 자유도 수를 줄이기 위하여 행렬응축기법⁽¹⁾을 기초로 하여 슈퍼요소와 부분구조⁽²⁾ 등이 주로 사용되었다. 또한 슈퍼요소와 가상보⁽³⁻⁵⁾를 이용하여 개구부가 있는 전단벽 건물이나 슬래브의 면외 휨강성을 고려할 수 있는 해석방법들도 제시되었다. 이들은 언급된 여러 방식을 이용하여 자유도수를 감소시켜 해석시간을 대폭 줄이고 동시에 상당히 정확한 해석결과를 나타내었다. 하지만 이들의 단점은 적용 가능한 해석 프로그램이 한정되어 있어 일반적인 상용 프로그램에서는 사용할 수 없다는 것이다. 그러므로 일반연구자, 특히 실무자들이 상용 프로그램을 이용하여 손쉽게 적용할 수 있는 등가모델의 필요성은 충분히 존재한다.

국내에서도 구조물의 내진설계에 대한 요구 및 관심이 증가하고 있다. 내진설계를 위해 지진해석이 필요하며, 해석 방법에는 등가정적해석법, 응답스펙트럼해석법, 시간이력해석법 등이 있다. 이들을 통해 층변위, 층간변위, 밀면전단력과 같은 구조물의 지진거동을 구하는데, 특히 시간이력해석법을 이용할 때 구조물 전체를 모델링하여 해석할 경우 해석시간 및 메모리 측면에서 부담이 되므로 주로 캔틸레버모델로 이상화하여 해석을 수행한다. 하지만 캔틸레버모델은 1차 진동주기만을 일치시키므로 모드형상이나 질량참여계수 등 다른 진동특성을 나타내는 값들은 일치하지 않는다. 구조물의 거동이 단순히 1차 진동주기에만 영향을 받는 경우를 제외한 대부분은 캔틸레버모델이 실제 거동을 표현하기는 어렵다. 또한 캔틸레버모델은 앞서 언급한 바닥판의 강성을 표현하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 벽식 구조물의 지진해석 시 바닥슬래브의 강성을 고려하면서 시간과 노력을 감소시키고 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 효율적인 등가모델을 제안하고자 하였다.

등가모델 작성 시 가장 중요한 요소는 원형구조물의 물리적 특성을 어떻게 잘 표현할 수 있는가이다. 특히 지진해석을 위해서는 구조물의 동적 특성이 중요하다. 따라서 지진해석을 위한 등가모델은 원형구조물의 동적 특성을 최대한 가깝게 표현할 수 있어야 한다. 중요한 동적 특성으로는 진동주기, 모드형상, 유효질량계수 등이 있는데, 본 연구에서는 진동주기는 기본으로 하고 모드형상이나 유효질량계수 등도 함께 일치시킬 수 있는 등가모델을 제안하였다. 제안

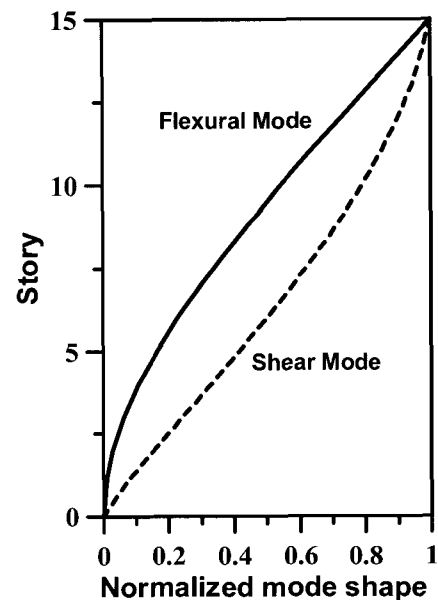
할 등가모델은 복잡한 원형구조물을 골조구조물의 기동과 보로 단순화 한 후 강성과 질량을 일치시키는 방법이다. 이 때 기동과 보의 강성은 유효질량계수를 이용하여 산정하였다. 이 등가모델은 원형구조물의 동적 특성을 유지하여 원형구조물과 비교적 정확한 해석결과를 얻을 수 있으며 구조물을 단순화 시켰기 때문에 해석시간 및 메모리 측면에서도 상당히 효율적이다.

2. 구조물의 변형 형상을 반영할 수 있는 등가모델

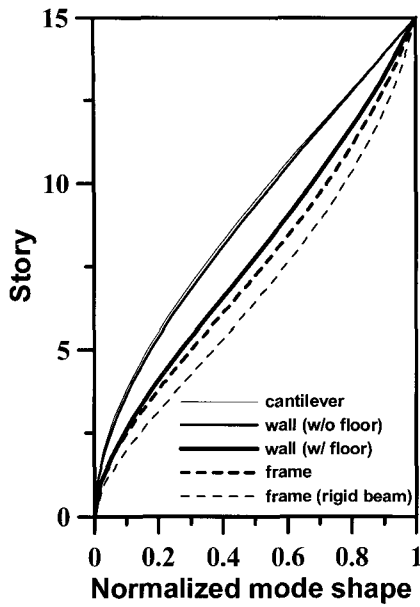
2.1 구조물의 변형형상

구조물의 변형형상의 종류는 크게 휨(flexure)모드와 전단(shear)모드로 나눌 수 있다. 휨모드는 캔틸레버 보의 전형적인 변형형태로서 단곡률(single curvature)을 가지며, 끝단으로 갈수록 변형량이 증가한다. 전단모드는 복곡률(double curvature)을 가지며, 끝단의 변형량이 휨모드와 같을 경우 중앙부에서의 변형량은 휨모드에 비해서 상대적으로 크다. 그림 1은 두 모드의 이러한 특징을 잘 보여주고 있다.

위의 휨모드와 전단모드는 변형형상의 가장 극단적인 형태이며 실제 구조물의 변형형상은 이 두 모드 사이에 위치하게 된다. 그림 2는 각 구조시스템의 1차 모드형상을 보여주고 있다. 먼저 횡력에 의한 프레임의 변형을 살펴보면, 프레임 구조물은 기동과 보의 휨 저항 능력으로 횡력에 저항한다. 전체 프레임 구조물의 변형은 보와 기동의 강성비에 따라 휨모드와 전단모드 사이의 변형으로 나타나며 그림 1의 전단모드 형상에 가깝다. 그림 2에서 진한 점선으로 나타난 곡선이 일반적인 프레임 구조물의 변형형상이다. 그림 2



〈그림 1〉 1차 모드 변형형상



〈그림 2〉 구조 형식별 1차 모드 변형형상

에서 가장 우측에 위치한 연한 점선으로 나타난 곡선은 보가 무한강성일 때 프레임 구조물의 변형형상이다. 보의 강성 증가로 인해서 프레임 구조물의 변형이 그림 1에 나타난 전단모드 변형형상에 더욱 가깝게 이동함을 알 수 있다.

벽식 구조물은 바닥이 강점으로 이루어진 캔틸레버 보와 같은 형태로 횡력에 저항한다. 해석 시 바닥판을 모델링하지 않고 단순히 강막 가정으로 할 경우에는 벽식 구조물의 변형형태가 그림 2에서 가장 좌측에 위치한 두 곡선 중 진한 실선의 곡선으로 나타난다. 이 형태는 그림에서 확인할 수 있듯이 캔틸레버의 변형형태와 거의 일치하며 이는 그림 1의 휨모드 형상이다. 따라서 바닥판을 모델링하지 않았을 때는 벽식 구조물과 캔틸레버의 모드 형상은 거의 동일하다. 만약 해석 시 바닥판을 모델링하면 바닥판의 면외 강성의 추가로 인해 변형형태는 전단모드의 영향이 추가되어서 나타난다. 이는 그림 2의 곡선 중 가운데에 위치한 가장 진한 실선이며, 바닥판이 모델링되지 않았을 때보다 전단모드 쪽으로 그 영향만큼 이동한다.

2.2 유효질량계수와 변형형상

구조물의 동적변형형태는 해당 구조물의 모드형상과 밀접한 관계가 있다. 구조물은 자신의 자유도와 일치하는 모드수를 보유하고 있으며 실제 변형은 모드별 변형을 참여정도를 반영하여 모두 더한 결과이다. 각 모드의 실제 거동에 참여하는 정도를 정량적으로 파악할 수 있는 값이 밀면전단 유효모드질량 또는 유효모드질량(M_n^* , n=모드 차수)이다. 이 유효모드질량을 나타내는 식은 다음과 같다(Chopra⁽⁶⁾).

$$M_n^* = \frac{\left(\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn} \right)^2}{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}^2} \quad (1)$$

여기서 N은 층 수, m_k 은 층 질량, 그리고 ϕ_{kn} 은 n차 모드의 k층 성분을 나타낸다. 이 유효모드질량의 합은 건물의 전체 질량과 같다. 즉,

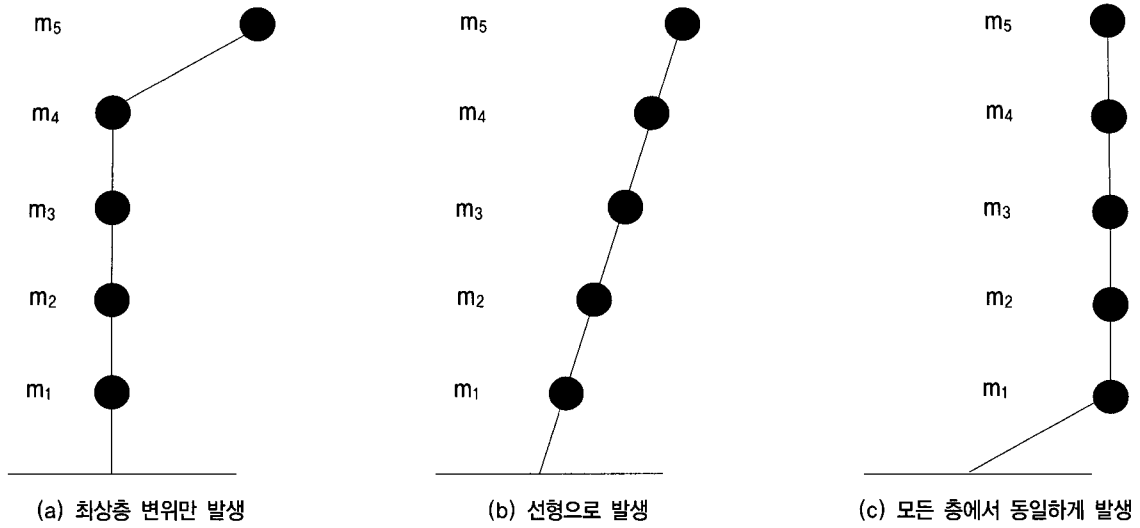
$$\sum_{n=1}^N M_n^* = \sum_{k=1}^N m_k \quad (2)$$

이 유효모드질량을 전체 질량으로 나누면 실제 거동에 대한 각 모드별 참여 정도를 알 수 있다. 이를 유효질량계수 (effective mass coefficient)라 하며 다음과 같은 식이다.

$$EMC_n = \frac{\left(\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn} \right)^2}{\left(\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^N m_k \right)} \quad (3)$$

여기서 ϕ_{kn} 은 1차 모드의 k층 성분이다. 이 유효질량계수는 이미 설명한대로 해당 모드의 전체 거동에 대한 참여 정도를 알 수 있는 값인데 식 (3)에서 알 수 있듯이 그 값은 각 층 질량과 모드 성분의 크기에 좌우된다. 따라서 각 층의 질량이 동일하다면 모드의 변형형상이 유효질량계수의 값에 큰 영향을 미친다.

변형형상과 유효질량계수의 관계를 보다 자세히 설명하기 위해 그림 3에 주어진 대로 세 가지 대표적인 변형형상을 사용하였다. 그림 3에서 (a)는 휨모드 (c)는 전단모드의 가장 극단적인 형태를 나타내며, 다른 예로 (b)의 선형인 경우를 추가하였다. 여기서 각각의 모드벡터는 (a)가 {0,0,0,1}, (b)는 {0.2,0.4,0.6,0.8,1}, (c)는 {1,1,1,1}이다. 모든 층의 질량이 동일하다고 가정하면 식 (3)을 이용하여 유효질량계수를 계산하면 (a)일 때 0.2, (b)일 때 0.82, (c)일 때 1.0이다. 결과적으로 변형형상이 휨모드에서 전단모드로 갈 수록 유효질량계수는 증가함을 알 수 있다. 이는 유효질량계수의 값이 구조물의 변형형상을 잘 반영하고 변형형상의 차이를 나타내는 값으로 사용될 수 있음을 나타낸다. 표 1은 그림 2에서 제시된 구조시스템들의 1차 모드에 대한 유효질량계수를 제공하고 있다. 여기서 각 구조시스템은 동일한 층수를 가지나 평면 형태는 임의로 정했으며, 각 층의 질량은 동일한 것으로 가정하였다. 캔틸레버에서 보 강성이 무한대인 프레임으로 갈수록 유효질량계수의 값이 증가함을 보여준다. 이렇게 유효질량계수는 변형형상을 반영할 수 있는 값이다.



〈그림 3〉 변형형상의 종류

〈표 1〉 구조 형식에 따른 1차 모드 유효질량계수

구조 형식	유효질량계수
cantilever	0.63
wall (w/o floor)	0.63
wall (w/ floor)	0.71
frame	0.73
frame (rigid beam)	0.77

한 가지 유의할 점은 동일한 층수를 가지더라도 평면 형태에 따라 유효질량계수의 값은 다르게 나타난다는 것이다. 특히 고려하는 전단벽 건물의 벽량에 따라 그 값은 변한다. 벽량이 증가한다면 유효질량계수도 따라 증가하며, 바닥판 고려 유무에 따른 차이는 감소하게 된다. 유효질량계수와 변형형상의 관계는 서현주⁽⁷⁾에 보다 자세히 서술되어 있다.

2.3 등가모델의 유도

그림 2에서 알 수 있듯이 약식 모델로 일반적으로 사용되는 캔틸레버모델의 변형형상은 바닥판이 포함된 벽식 구조물의 변형형상과 일치하지 않는다. 따라서 실제 벽식 구조물의 거동은 캔틸레버모델로 표현할 수 없다. 하지만 바닥판 모델이 포함된 벽식 구조물은 일반적인 골조와 변형형상이 유사하고 유효질량계수 또한 비슷한 값을 가진다(표 1). 따라서 프레임 형식의 구조물을 이용한 등가의 약식 모델을 작성한다면 벽식 구조물의 실제 거동과 동일한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

이미 설명한 바와 같이 변형형상과 유효질량계수는 밀접한 관계를 가지고 있다. 그림 2와 표 1에서 유추할 수 있는 사항은 프레임 구조물에서 보 부재의 강성을 조절한다면 변형형상(또는 유효질량계수)을 바닥판을 가진 벽식 구조물과

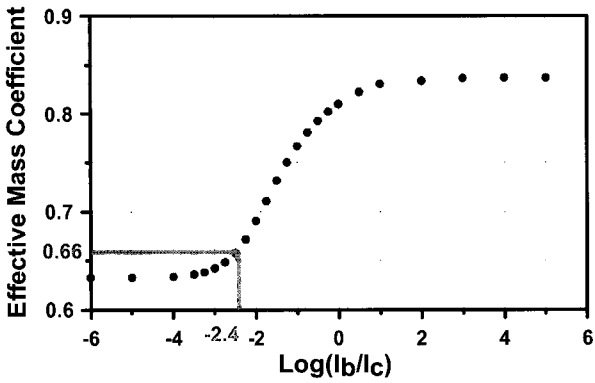
일치시킬 수 있다는 것이다. 유효질량계수를 보면 프레임 구조물에서 무한 강성 보일 때 유효질량계수는 0.77이며 일반적인 보일 때는 0.73이다. 보의 강성을 계속 감소시키면 바닥판을 가진 벽식 구조물의 유효질량계수 0.71과 일치시킬 수 있다.

이를 보다 자세히 살펴보기 위해 프레임 구조의 기둥 강성을 고정시키고 보의 강성을 변화시켜 보/기둥 강성비의 변화에 따른 유효질량계수(그림 4)와 변형형상(그림 5)을 구하였다. 보/기둥 강성비는 로그 축척으로 표시하였다. 그림 4에서처럼 보 강성이 무한대로 커지거나 작아지면 질량 참여율은 일정하게 유지되며 그 사이에서는 보 강성이 증가할수록 질량 참여율도 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 5의 변형형상을 보면 보 강성이 작을수록 캔틸레버에 가까운 형태를 나타내고 보 강성이 커질수록 전단 거동과 가까운 형태를 나타내고 있으며 유효질량계수가 일정하게 유지되는 부분에서는 모드형상도 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 프레임 구조를 이용한 등가모델의 작성은 원형모델과 변형형상을 일치시키기 위하여 1차 모드의 유효질량계수에 일치하는 보/기둥 강성비를 구한 후 보와 기둥의 강성을 축척하여 구조물의 동적특성인 고유진동주기를 일치시키는 방법을 사용한다.

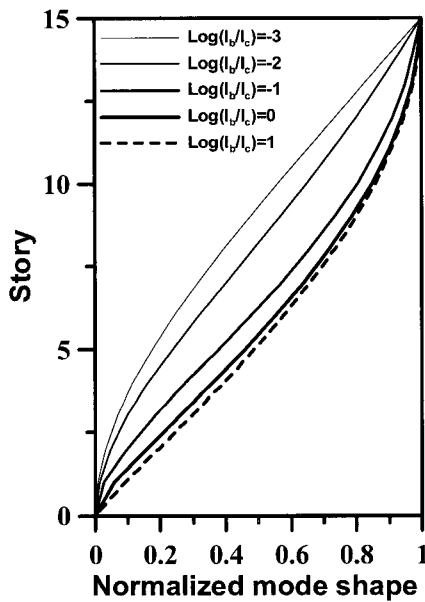
3. 구조물의 변형형상을 고려한 등가모델 - 대칭 구조물

3.1 등가모델 구성

등가모델의 정확성과 효율성을 확인하기 위하여 예제 건물로 그림 6의 평면을 가지는 15층 벽식 아파트를 선정한다

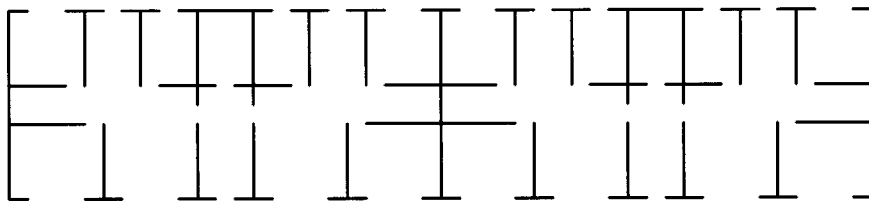


〈그림 4〉 프레임 구조의 보/기둥 강성비 변화에 따른 1차모드 유효질량계수

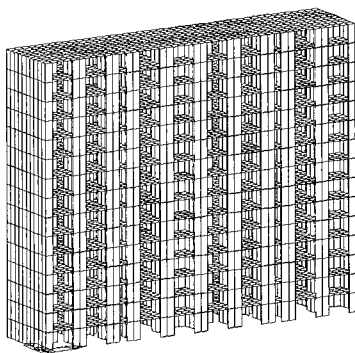


〈그림 5〉 프레임 구조의 보/기둥 강성비 변화에 따른 모드형상

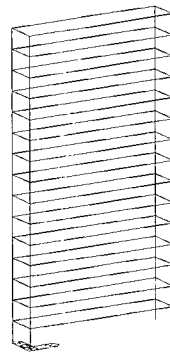
후 위에서 제시한 등가모델 유도 방법을 적용한 등가모델, 벽식 아파트를 실제로 모델링한 원형모델, 그리고 주로 사용되고 있는 캔틸레버모델을 작성하여 지진해석 결과를 비교하였다. 그림 7은 원형모델, 등가모델, 캔틸레버모델을 각각 보여주고 있다. 원형모델은 벽과 바닥판을 모두 유한요소로 모델링하여 절점과 요소의 수가 매우 크기 때문에 해석 시간이 많이 소요되고 해석 결과를 분석하기가 간편하지 않다. 등가모델은 원형모델을 보와 기둥만을 이용하여 나타낸 모델이며 등가모델의 질량은 원형모델의 총 질량을 4개의 절점에 나누어 입력하였다. 등가모델은 원형모델에 비해 절점과 요소의 수가 매우 감소하여 해석 시간이 현저히 줄어들었으며 해석 결과의 분석도 원형모델에 비해 매우 편리하다. 캔틸레버모델의 총 질량을 한 점에 집중질량으로 입력하였고 기둥의 강성을 조절하여 각 방향의 1차 모드 주기를 일치시켰다. 캔틸레버모델은 가장 간단한 모델이나 해석 시간에 있어 등가모델과 큰 차이는 없고 오히려 바닥판이나 비대칭 건물의 특성을 나타내기 어려운 단점이 있다. 모델간의 장, 단점은 예제 건물의 해석 결과를 통해 검증될 것이다. 등가모델을 구성하기 위하여 먼저 원형구조물의 횡방향 1차 모드형상을 구하였다. 그 다음 식 (3)을 따라 질량참여율을 구하였으며, 그 값은 66.3%이다. 이를 이용하여 등가모델을 구성하는 보/기둥 강성비를 그림 4의 관계에서 구할 수 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 질량참여율 66.3%에 해당하는 보/기둥 강성비의 Log는 -2.4이고 실제 보/기둥 강성비는 0.004가 된다. 등가모델은 그림 7(b)의 프레임 형식의 모델을 구성하여



〈그림 6〉 15층 벽식 아파트 평면도



(a) 원형모델



(b) 등가모델



(c) 캔틸레버모델

〈그림 7〉 벽식 아파트의 해석모델

각 층마다 원형구조물과 동일한 질량을 대입하고 보와 기둥의 강성은 계산된 보/기둥 강성비를 유지하면서 전체 건물의 진동주기가 원형구조물과 일치하도록 조절하여 얻어진다. 이 때 보와 기둥 한쪽의 강성을 고정시킨다면 다른 한쪽의 강성만을 조절하여 진동주기를 일치시킬 수 있을 것이다.

등가모형을 원형모델 및 캔틸레버모델과 비교하기 위하여 각 모델의 고유진동주기 및 모드질량(표 2)과 모드형상(그림 8)을 비교하였다. 등가모형과 캔틸레버모델의 1차 고유진동주기는 원형모델의 1차 진동주기에 일치시켰기 때문에 모두 동일하다. 2차, 3차 모드로 갈수록 캔틸레버모델은 등가모형에 비해 원형모델과의 차이가 증가함을 알 수 있다. 등가모형은 바닥슬래브의 강성을 표현할 수 있어 원형구조물의 1차 모드 진동주기뿐만 아니라 모드 형상을 함께 일치시켰기 때문에 2차, 3차 모드에서도 비록 원형구조물의 진동주기와 약간의 차이가 있지만 캔틸레버모델에 비해서 그 차이는 매우 작다. 따라서 2차, 3차 모드의 영향이 작용하는 중간층의 변형에서 등가모형과 캔틸레버모델의 차이가 발생할 가능성이 크다. 유효질량계수를 이용한 등가모형은 모드질량의 대부분을 차지하고 있는 1차 모드에서 진동주기뿐

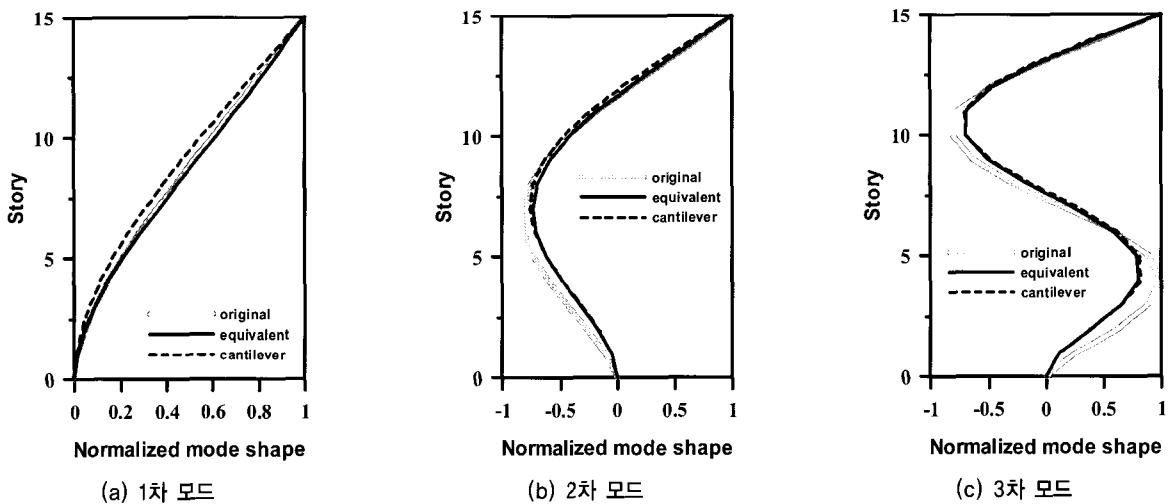
만 아니라 모드질량도 함께 원형모델을 잘 모사하고 있으나 캔틸레버모델은 1차 모드질량에서 원형모델과 차이를 보여주었다. 반면에 모드형상의 경우는 2차, 3차 모드로 갈수록 등가모형과 캔틸레버모델은 서로 비슷하면서 모두 원형모델과 차이를 보였다. 하지만 구조물의 거동에 가장 영향이 큰 1차 모드형상과 1차 모드질량에서 등가모형과 캔틸레버모델은 차이가 있다. 그림 8(a)에서 나타나듯이 최상층 변위가 동일하다고 한다면 캔틸레버모델의 중간층에서 변위는 원형과 등가모형보다 작을 것이다. 이는 다음절의 해석결과에서 확인할 수 있다.

3.2 등가모형을 이용한 지진해석

등가모형의 정확성을 검증하기 위하여 표 3에 제시된 4개의 지진을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 사용된 4개의 지진은 예제 건물의 1차 고유주기 인근에서 반응스펙트럼이 상대적으로 크게 나타나는 경우를 선택하였다. 결과 비교를 위하여 지붕층과 함께 중간층의 변위도 함께 조사하였다. 이는 단순히 진동주기뿐만 아니라 모드형상을 함께 확인해 볼 수 있어 등가모형의 모사능력을 잘 확인할 수 있기 때문

〈표 2〉 각 모델의 고유진동주기 및 모드질량 - 대칭 구조물 (횡 방향)

모드	원형모델		등가모형		캔틸레버모델	
	주기(sec)	모드질량(%)	주기(sec)	모드질량(%)	주기(sec)	모드질량(%)
1차	0.639	66.3	0.639	67.0	0.639	63.3
2차	0.147	19.2	0.142	16.3	0.102	19.5
3차	0.066	5.9	0.056	6.35	0.038	6.7



〈그림 8〉 각 모델의 모드형상 - 대칭 구조물 (횡 방향)

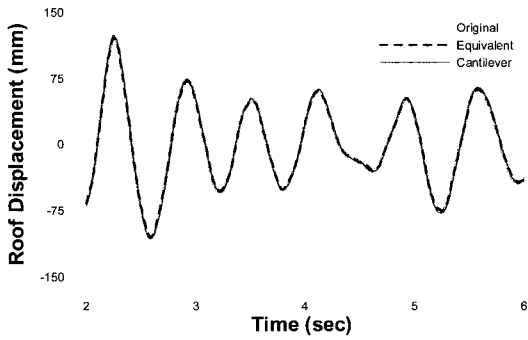
〈표 3〉 해석에 사용된 지진 기록

지진명	발생연도	상세내용	PGA(g)	Duration (sec)
Imperial Valley	1940	El Centro Site, 270 Deg	0.357	53.72
Loma Prieta	1989	Oakland Outer Wharf, 270 Deg	0.276	39.98
Northridge	1994	Sylmar County Hosp., 90 Deg	0.605	59.98
Hyougoken_South	1995	T2-I-1, NS	0.828	30.00

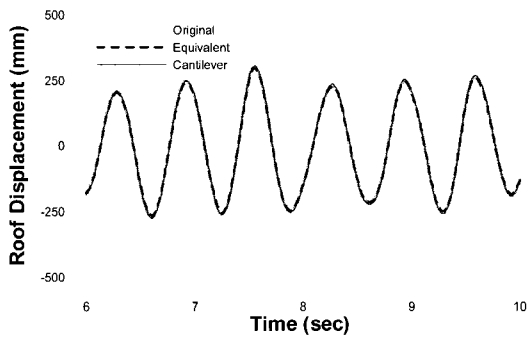
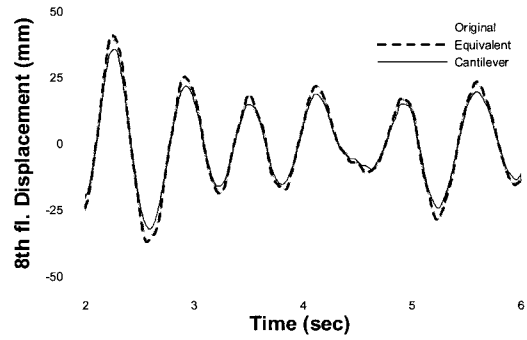
이다. 해석은 MIDAS GenW⁽⁸⁾을 사용하여 수행하였다.

그림 9는 각 지진에 대한 지붕층과 중간층(8층)의 횡방향 변위를 그린 것이다. 지붕층의 변위는 네 지진 모두 원형모델, 등가모델, 그리고 캔틸레버모델 사이에 차이가 없었다. 그 이유는 등가모델이나 캔틸레버모델 모두 원형모델과 1차 고유진동주기가 일치하므로 각각의 모델을 같은 진동주기를

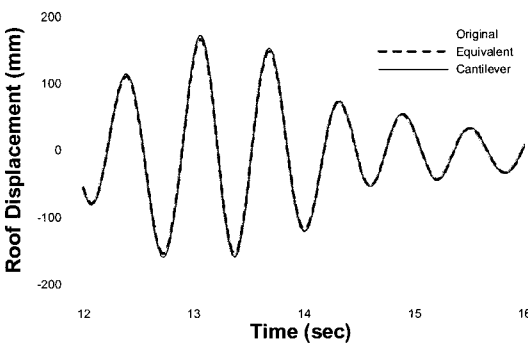
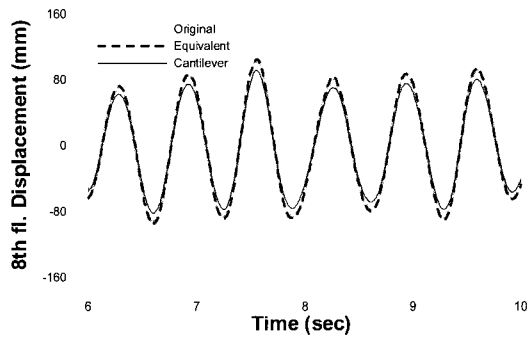
를 가지는 단자유도로 모델로 가정하면 지붕층의 변위가 거의 일치하는 현상을 설명할 수 있다. 반면에 중간층 변위의 경우는 이미 설명한바와 같이 모드형상에 따라 캔틸레버모델의 응답 값이 원형이나 등가모델에 비해 작음을 확인할 수 있다. 하지만 그 차이는 매우 크지 않은데, 그 이유는 구조물이 1차 모드의 영향이 2, 3차에 비해 상대적으로 크고



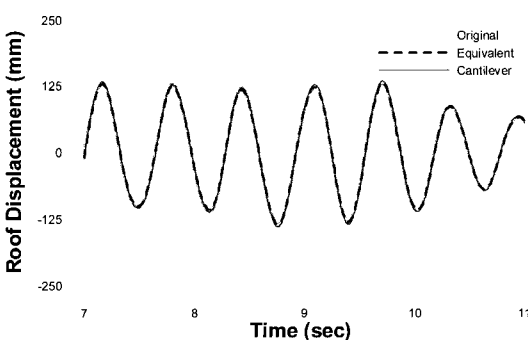
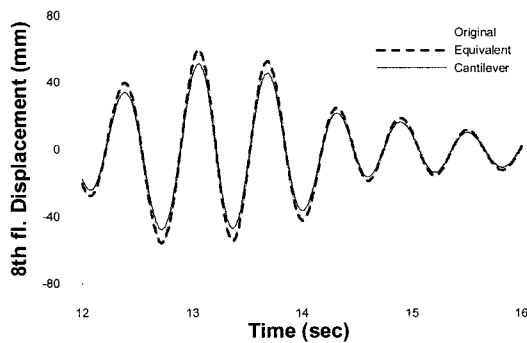
(a) Imperial Valley



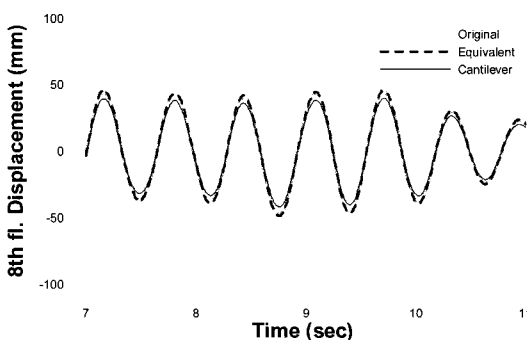
(b) Hyougoken South



(c) Loma Prieta



(d) Northridge



〈그림 9〉 횡방향 시간이력응답 비교 - 대칭 구조물

대칭이기 때문에 캔틸레버모델에 대한 등가모델의 우수성이 발휘되지 못한 조건이기 때문이었다. 따라서 원형구조물의 강성 또는 질량이 비대칭일 경우에는 등가모델과 캔틸레버모델의 차이가 더욱 확연히 나타날 것이다. 이를 확인하기 위해 다음 장에서 질량이 비대칭일 경우를 가정하여 각 모델의 결과를 비교하였다.

4. 구조물의 변형형상을 고려한 등가모델 - 비대칭(질량) 구조물

4.1 등가모델 구성

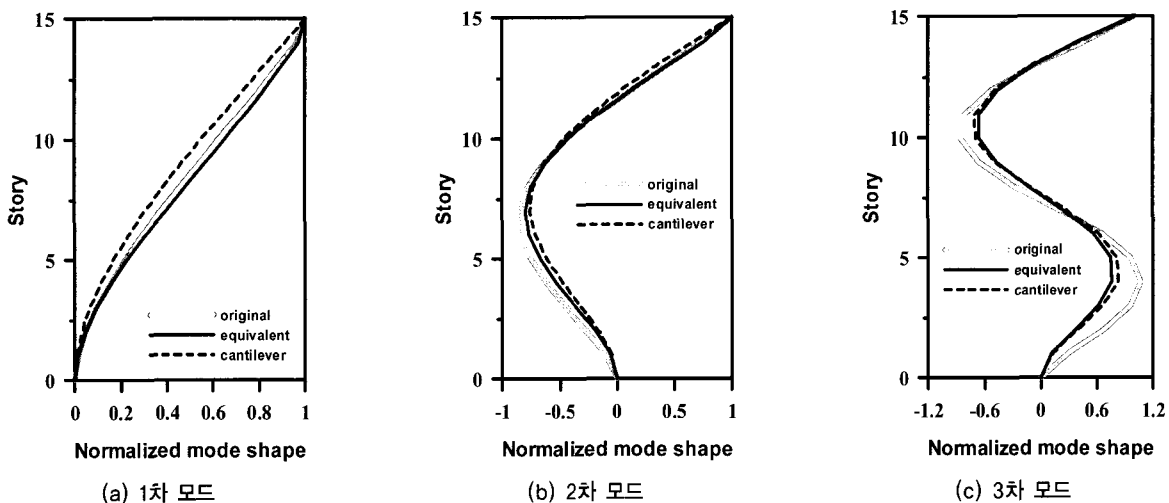
3장에서 대칭 구조물을 대상으로 등가모델을 구성하여 원형 및 캔틸레버모델과 비교하였다. 등가모델이 캔틸레버모델에 비해 우수하였으나 구조물이 대칭인 관계로 결과의 차이는 크지 않았다. 따라서 비대칭 구조물을 대상으로 등가모델을 구성하여 원형모델 및 캔틸레버모델과 비교하였다. 여기서는 간단한 예제를 만들기 위해 질량만이 비대칭인 것으로 가정하였다. 그림 6의 평면과 강성은 동일하나 중심으로부터 좌, 우측의 질량을 증가 및 감소시켜 전체 질량의 크기는 유지하면서 질량의 중심만 이동시켰다. 강성 중심과 질량 중심의 편심은 종방향 길이의 10%로 가정하였다. 이번 경우는 질량이 비대칭이나 강성은 동일하므로 등가모델의 구성과정은 전체적으로 앞 장을 그대로 따랐으나 질량만은 원형구조물의 질량 편심량과 일치하도록 양단 절점에서의

질량 크기를 조절하였다. 따라서 보 및 기둥의 강성은 앞 장의 등가모델과 동일하고 각 절점의 질량만이 변하였다. 다만 편심의 영향으로 구조물의 비틀림 현상이 증가함으로 기존 등가모델에서 기둥의 비틀림 강성을 조절하여 원형구조물의 비틀림 모드와 일치시켰다.

표 4는 각 모델의 고유진동주기와 모드질량을 비교한 것인데, 대칭구조물과 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다. 1차 모드에서 세 모델 모두 진동주기는 일치하지만 모드질량을 살펴보면 캔틸레버모델은 다른 두 모델과 큰 차이가 난다. 캔틸레버모델은 2차, 3차 모드로 갈수록 진동주기와 모드질량에서 원형모델과 차이가 증가함을 알 수 있다. 모드형상을 비교한 결과인 그림 10에서도 대칭구조물의 결과(그림 8)와 유사한 현상을 확인할 수 있다. 캔틸레버모델은 1차 모드형상에서 원형 및 등가모델과 차이를 보여주었으나 2차, 3차 모드에서는 등가모델과 차이가 없었다. 결과를 종합하면 질량이 비대칭인 구조물에서도 등가모델은 원형모델의 진동주기, 모드질량, 그리고 모드형상을 잘 모사하고 있으나 캔틸레버모델은 구성방법의 한계로 인해 구조물의 비대칭성이 반영되지 않아 원형모델과의 차이가 증가하였다. 한 가지 유의할 점은 캔틸레버모델도 강체요소를 사용하여 질량중심을 강성중심으로부터 분리시켜 구조물의 질량 비대칭성을 반영할 수 있다는 것이다. 하지만 이러한 방식은 가장 간편한 구성 방법을 따르는 캔틸레버모델에 적합하지 않으며 다른 장점들을 보유하고 있는 등가모델에서 쉽게 적용할 수 있다.

〈표 4〉 각 모델의 고유진동주기 및 모드질량 - 비대칭(질량) 구조물 (횡 방향)

모드	원형모델		등가모델		캔틸레버모델	
	주기(sec)	모드질량(%)	주기(sec)	모드질량(%)	주기(sec)	모드질량(%)
1차	0.707	49.0	0.708	51.1	0.707	63.3
2차	0.162	14.6	0.170	9.0	0.113	19.5
3차	0.073	3.9	0.049	3.6	0.041	6.7

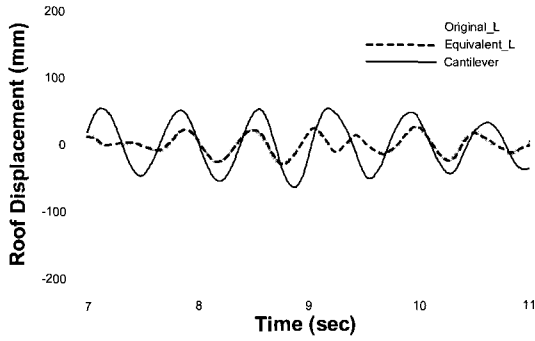


〈그림 10〉 각 모델의 모드형상 - 비대칭(질량) 구조물 (횡 방향)

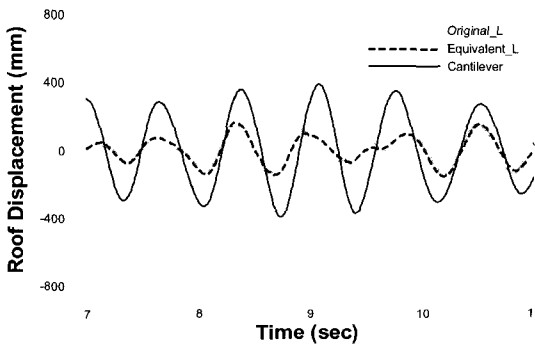
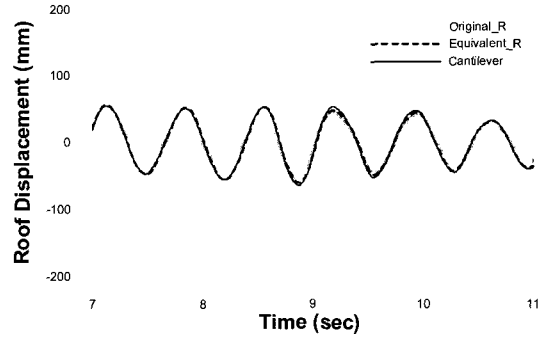
4.2 등가모델을 이용한 지진해석

대칭구조물의 경우와 마찬가지로 비대칭구조물에서도 4개의 지진을 이용하여 해석을 수행한 후 지붕층과 중간층의 변위를 조사하여 각 모델의 결과를 비교하였다. 질량 비대칭구조물의 경우에는 편심으로 인해 각 층에서 바닥의 위치에 따라 변위값이 다르다. 따라서 원형이나 등가모델은 같은

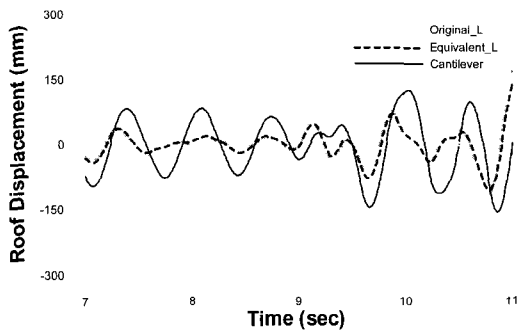
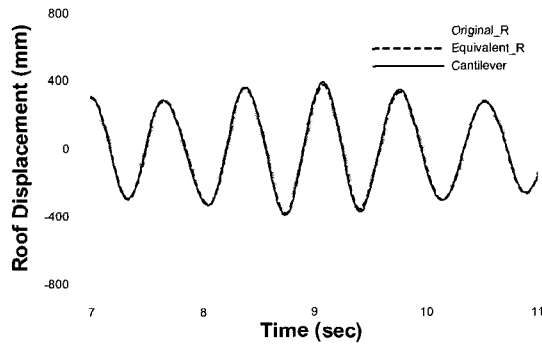
층이라도 평면에서의 위치에 따라 변위가 다르나 캔틸레버 모델은 각 층에서 오직 한 위치(강성중심)의 결과만을 나타내므로 서로 차이가 발생한다. 이를 확인하기 위해 원형모델에서 등가모델의 좌, 우측 끝단과 일치하는 위치의 변위를 추출하여 그 값들을 등가모델 및 캔틸레버모델의 결과와 비교하였다. 그 결과를 그림 11에 나타내었는데, 그림에서



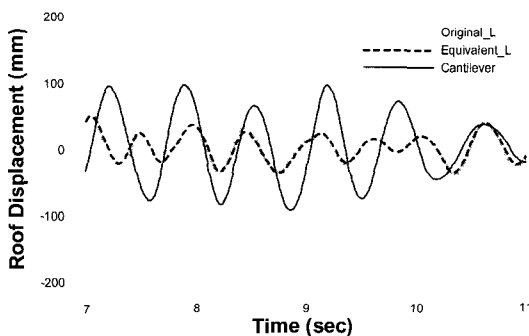
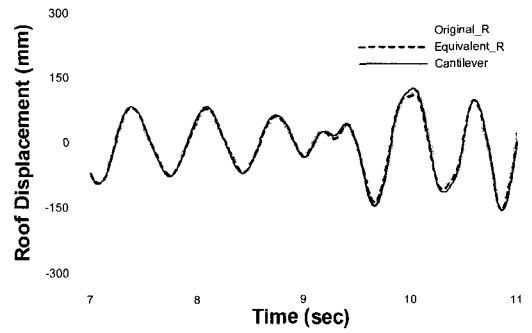
(a) Imperial Valley



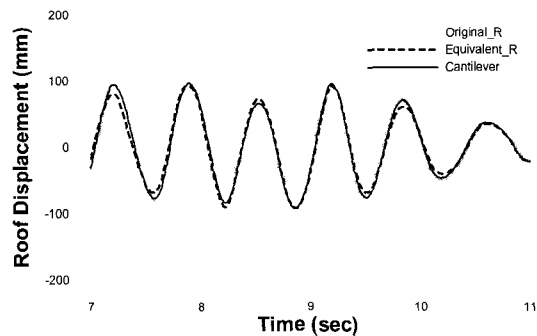
(b) Hyougoken South



(c) Loma Prieta



(d) Northridge

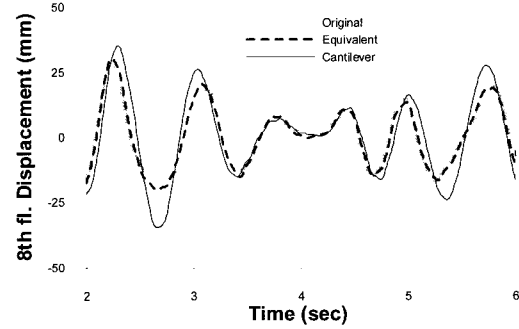
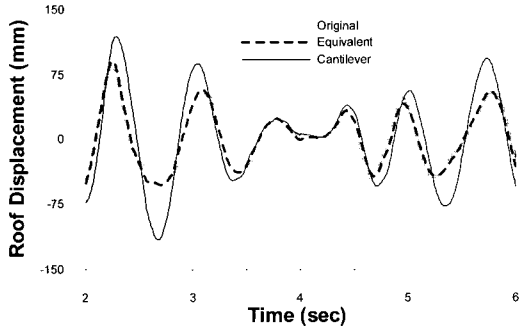


〈그림 11〉 양 측면 모서리에서의 횡방향 시간이력응답 비교 - 비대칭(질량) 구조물

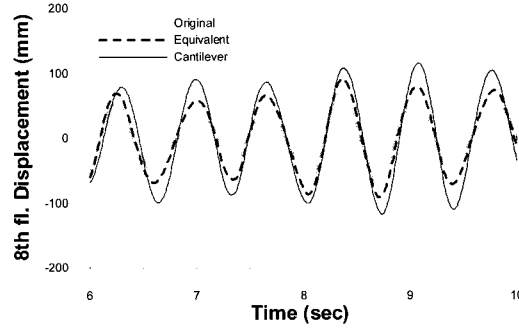
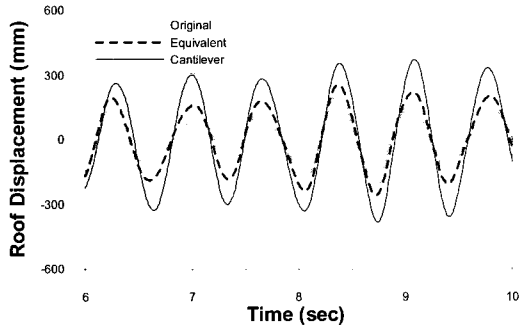
왼쪽에 위치하는 그래프들은 왼쪽 끝단, 오른쪽에 위치하는 그래프들은 오른쪽 끝단의 결과를 나타내고 있다. 여기서 캔틸레버모델의 결과는 위치에 관계없이 동일한 값을 가진다. 그림 11에서 확인할 수 있듯이 원형과 등가의 결과들이 지진의 종류 및 변위 측정 위치에 따라 서로 비슷한 값을 보이기도 하고 그 반대의 결과를 보이기도 한다. 전체적으로 왼쪽에 위치한 그래프에서는 원형과 등가의 결과가, 오른쪽

에 위치한 그래프에서는 등가와 캔틸레버의 결과가 유사함을 알 수 있다. 이와 같이 비대칭구조물일 경우 평면 위치에 따라 전혀 다른 결과를 얻을 수 있음을 주지해야 한다.

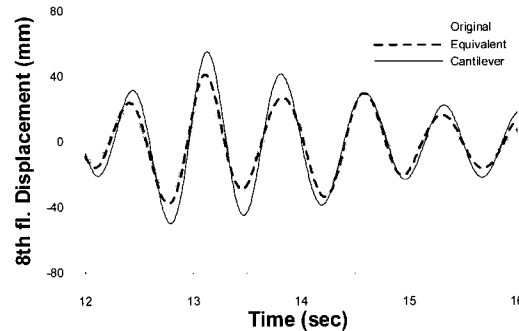
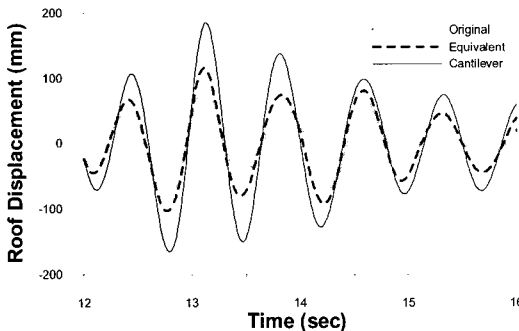
그러므로 비대칭구조물의 원형 및 등가모델에서는 양 끝단 변위의 평균을 취하여 캔틸레버의 결과와 함께 비교하여 그림 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 등가모델은 원형모델의 결과를 비교적 잘 모사하고 있으나 캔틸레버모



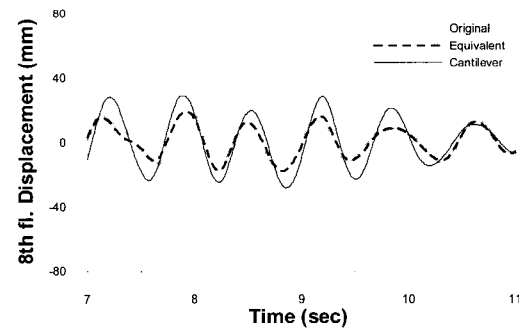
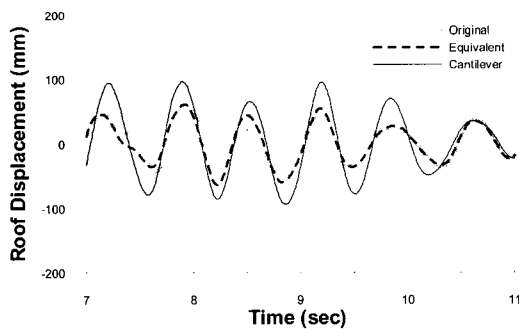
(a) Imperial Valley



(b) Hyougoken South



(c) Loma Prieta



(d) Northridge

〈그림 12〉 횡방향 시간이력응답 비교 - 비대칭(질량) 구조물

델은 원형과 확연한 차이를 보이고 있다. 대칭구조물의 결과와 비교해서 등가모델은 원형모델과 편차를 보이고 있는데, 그 이유는 등가모델의 작성 시 1차 중, 횡 방향 이동 및 회전 진동주기를 원형과 일치시켰으나 이들은 서로 결합되어 있으며 지진에 내재되어 있는 진동수들에 의해 다양한 조합으로 나타나 원형모델의 변위를 완벽하게 모사하기 어려운 점을 들 수 있다. 이러한 편차에도 불구하고 비대칭구조물의 해석결과 본 연구에서 제시한 등가모델의 우수성을 더욱 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 변형형상과 밀접한 관계가 있는 유효질량계수를 이용하여 빠르고 간편하게 사용할 수 있는 등가모델을 구성하는 방법을 제안하였다. 제안된 등가모델을 원형구조물의 모델 및 일반적으로 사용되고 있는 캔틸레버모델과 여러 지진운동을 가하여 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 제안된 등가모델은 어떤 상용프로그램에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 해석시간 단축이 가능하여 단시간 다양한 지진에 대한 해석이 필요한 경우 매우 유용하게 사용될 수 있다.
2. 제안된 등가모델은 바닥슬래브를 모형화 할 수 있어 그렇지 않은 캔틸레버모델 보다 벽식 아파트의 거동을 더욱 잘 모사할 수 있으며, 해석 시 소요시간은 캔틸레버모델과 큰 차이가 없었다. 따라서 등가모델은 정확성과 효율성에 있어 캔틸레버모델 보다 더 우수하다고 할 수 있다.
3. 제안된 등가모델의 우수성은 비대칭 구조일 때 더욱 발휘된다. 등가모델은 네 개의 기둥을 사용하기 때문에 질량

이나 강성 비대칭을 충분히 고려할 수 있기 때문이다. 캔틸레버모델은 질량 비대칭의 경우 조작을 통해 가능하나 강성 비대칭은 전혀 고려할 수 없다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국 21사업의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Guyan, R.J., "Reduction of Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, 1965, pp. 380.
2. Petersson, H. and Popov, E. P., "Substructuring and equation system solutions in finite element analysis," *Computers and Structures*, Vol. 7, 1977, pp. 197-206.
3. Lee, D.G., Kim, H.S. and Chun, M.H., "Efficient Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Buildings considering the Flexural Stiffness of Floor Slabs," *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 5, 2002, pp. 613-623.
4. Kim, H.S. and Lee, D.G., "Efficient Analysis of Shear Walls with Openings," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 8, 2003, pp. 981-991.
5. Lee, D.G. and Kim, H.S., "Analysis of Shear Wall with Openings using Super Elements," *Proceeding of EASEC-8, Singapore*, December, 2001, Paper No. 1378.
6. Chopra, A.K., "Dynamics of Structures," *2nd edition*, Prentice Hall, 2001.
7. 서현주, "고층건물의 비틀림 거동 개선에 관한 연구," 박사학위논문, 성균관대학교, 1998.
8. Midas GenW, General Structure Design System for Windows, MIDAS Information Technology Co. Ltd., 2005.