기술기사

유한요소법을 이용한 하부골조 상부벽식 주상복합건물 해석기법

- 연직 하중에 대한 해석적 고찰 -

송 진 규*

황 재 호**

조 석 희***

1. 서 론

하부골조 상부벽식 형식 주상복합 건물의 구조해석은 상층부의 하중이 하부골조로 전달되면서 발생되는 하부 벽체 단부의 응력집중 현상과 전이보 근처에서 하중 전달과정이 전체 구조물의 거동 및 응력 전달 메카니즘에 매우 큰 영향을 미치게 되어, 이에 대한 해석상의 적절한 고려가 이루지지 못할 경우 설계상의 오류를 범하게 된다. 특히, 한 경간에서 불연속 벽체가 존재할 경우 2차원 해석으로는 슬래브의 강성이 벽체에 미치는 효과를 포함하기가 곤란하며 또한, 하부의 골조와 상부의 벽체가 만나게 되는 전이층에서의 국부 응력이 시스템 전체의 파괴 모드를 지배하게 되나 고층건물에 대한 3차원 해석에서 이러한 locality를 고려하기는 쉽지 않다. 이제까지 이러한 구조시스템에 대한 국부응력을 분석하기 위하여 정형적인 형태를 갖는 1경간 또는 2경간 시스템에 대한 2차원 해석 사례가 있었으나, 실제의 경우는 불연속 벽체로 인하여 평면 배치가 매우 비정형적이므로 2차원 해석만으로는 해석의 정확도에 한계가 존재한다. 따라서 본 고에서는 보다 합리적인 해석 및 설계 방법을 제시하기 위하여 슬래브 효과를 고려한 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 이와는 별도로, 실무적으로 적용 가능한 간편 해석법을 }+제안하기 위하여 2차원 해석을 수행하고, 다음으로 3차원 해석시 데이타의 입력이 용이하고 결과분석이 쉬워 실무에서 많이 이용되는 ETABS 프로그램의 해석결과와 3차원 정밀해석 결과를 비교하였다.

* 정회원·현대건설기술연구소, 선임연구원
** 정회원·현대건설기술연구소, 주임연구원
*** 현대건설기술연구소, 주임연구원

2. 3차원 해석 예

본 고에서는 3차원 주상복합건물의 거동을 고찰하기 위하여 그림 1, 그림 2와 같이 이상화된 가상모델을 설정하였다. 평면 형태는 실제로 존재 가능한 벽체의 배치 형태를 고려하고 이에 따른 응력상태를 구현하기 위하여 그림 1에서와 같이 여러 형태의 불연속벽이 배치된 판상형 평면을 구성하였다. 예제 구조물은 29층으로써 1층의 층고는 4.8m, 나머지 층의 층고는 2.8m이며, 2층 부분에 춤이 큰 전이보(transfer girder)를 두어 상부에서 벽체를 통해 전달되는 하중을 지지하여 기둥으로 전달하도록 하였다. 해석은 대상 모델에 대하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였고 여기에서 기둥은 선요소(line element)로 모델링하였으며 전이보, 전단벽과 각 층의 바닥판은 쉘요소로 구성하였다. 작용하중은 고정하중과 사용하중을 모두 고려하였으며 하중은 계수하중을 적용하였다.

2.1 하중조건

예제 구조물의 해석을 위하여 아래와 같이 가정된 고정하중(×1.4)과 적재하중(×1.7)을 적용하였다.

1) Dead Load(전층동일)

Panel Heating(THK : 120㎜)	: 240kg/m²
Slab self weight(150㎜)	: 360kg/m²
	600kg/m²

2) Live load : 200kg/m²

2.2 부재단면 치수

각 부재의 단면은 다음과 같이 가정하였다.

1) Transfer Girder(b×h)	: 800㎜×2400㎜
2) Column	: 1000㎜×1000㎜
3) Wall Thickness	: 200㎜
4) Slab Thickness	: 150㎜

3. 2차원 해석과 3차원 해석결과 비교

본 절에서는 앞에서 제시한 가상 모델에 대한 정해를 얻기 위하여 슬래브를 포함한 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며 이를 실무에서 중력하중에 대한 해석시 일반적으로 적용하는 2차원 모델링 방법에 의한 결과와 비교하기 위하여 대상 평면 중 X3, X4, Y2, Y3 line을 선정하여 동일 프로그램으로 2차원 해석을 수행하였다. 각 해석결과는 주로 전이보의 휨모멘트와 하부 벽체의 지압응력에 주안점을 두어 비교·분석하였다.

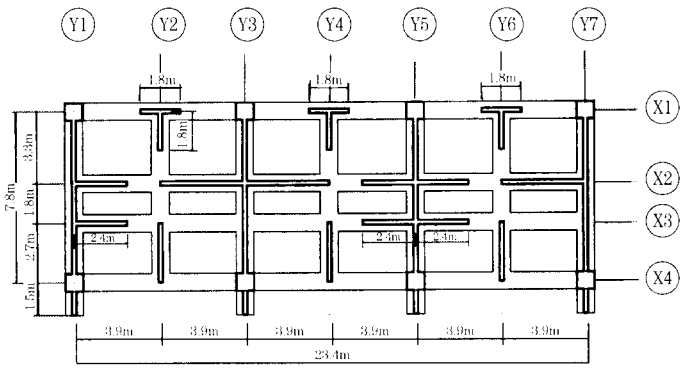

그림 1 예제 구조물의 평면도

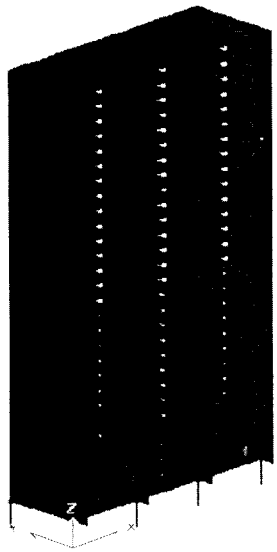

그림 2 예제 구조물의 입면도
(SAP2000 모델링)

3.1 2차원 해석모델

2차원 해석모델은 3차원 모델의 해당 line만을 따로 떼어내어 해석한 것으로 슬래브 및 다른 전이보와의 연결이 고려되지 않는다는 점에서 3차원 모델과 차이점을 갖는다. 해석 line에 작용하는 슬래브 하중의 산정은 편의상 3차원 해석결과를 이용하여 전단벽에 등분포로 작용시켰으며, 기둥과 직접 연결되지 않은 X3, Y2 line 전이보의 지지조건은 3차원 해석결과의 X3, Y2 line 변형형상을 참고하여 결정하였다. 3차원 해석시 X3, Y2 line 전이보의 변형형상은 그림 3, 그림 5와 같으며 이를 고려한 2차원 해석모델은 그림 4, 그림 7에서처럼 한쪽 끝단은 회전단, 다른 지점들은 모두 이동단으로 설정하였다. X4, Y3 line의 경우는 지점조건의 변화없이 기둥에 직접 연결되어 있는 것으로 그림 5와 그림 7과 같이 모델링하였다.

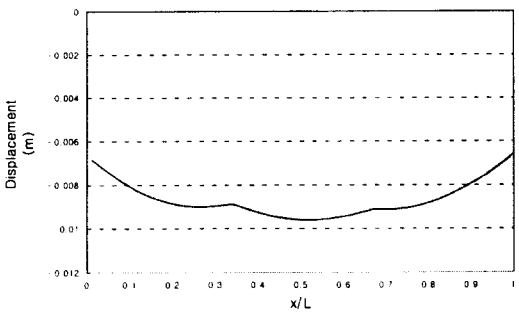

그림 3 X3 line 전이보의 변형형상(3차원 해석결과)

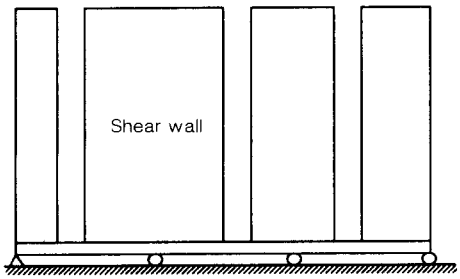

그림 4 X3 line 해석 모델링(2차원 해석)

3.2 전이보의 휨모멘트 해석결과 비교

앞에서 설정한 해석 예제의 전이보 휨모멘트를 그림 9~그림 12에 나타내었다. 여기서 x축은 보의 스팬에 대해 무차원화 하였으며 y축은 전이보 쉘요소의 응력(stress)으로부터 계산되어진 모멘트값(t·m)이다. 그림에서 보면 X3 line과

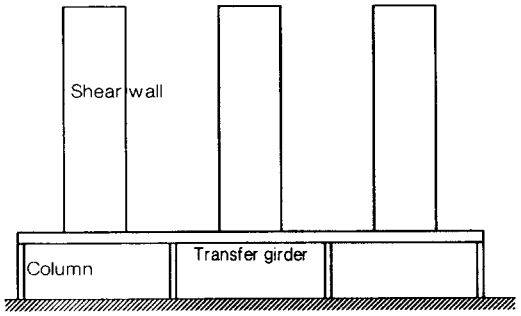

그림 5 X4 Line 해석 모델링(2차원 해석)

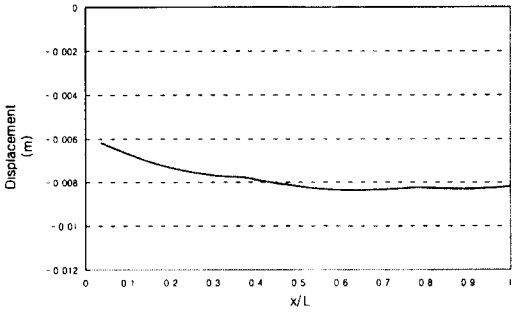

그림 6 Y2 line 전이보의 변형형상(3차원 해석결과)

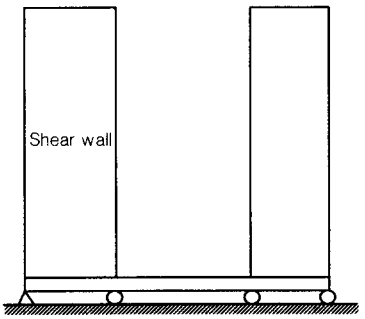

그림 7 Y2 line 해석 모델링(2차원 해석)

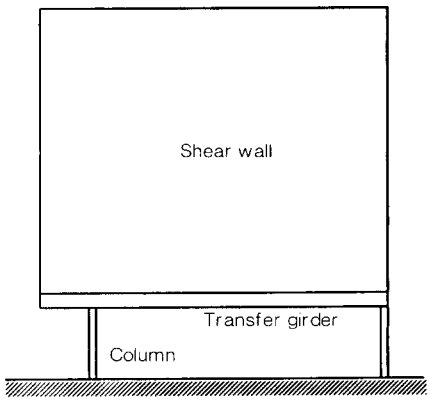

그림 8 Y3 line 해석 모델링(2차원 해석)

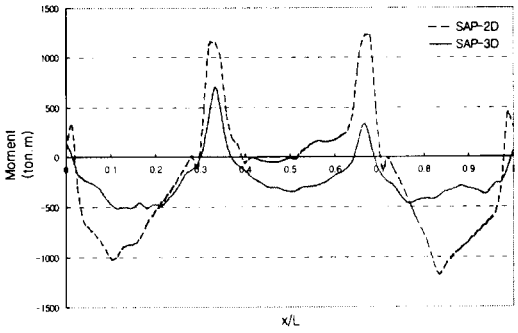

그림 9 X3 line 전이보 휨모멘트

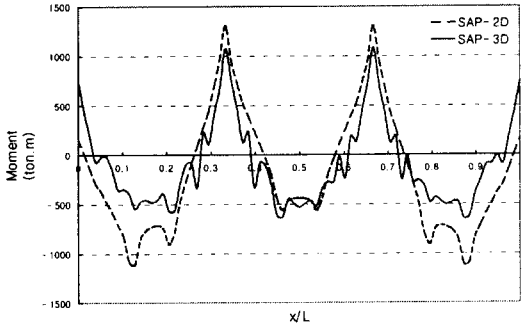

그림 10 X4 line 전이보 휨모멘트

X4 line의 경우에는 비교적 2차원 해석결과와 3차원 해석결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다. X4 line은 전이보가 기둥에 직접 지지되어 있기

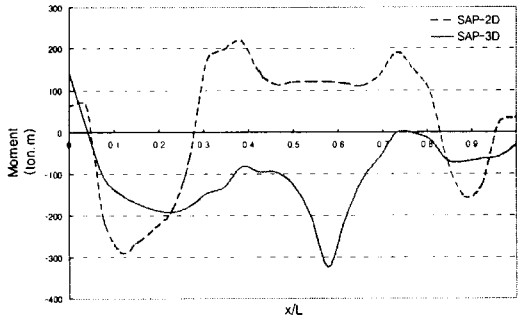

그림 11 Y2 line 휨모멘트

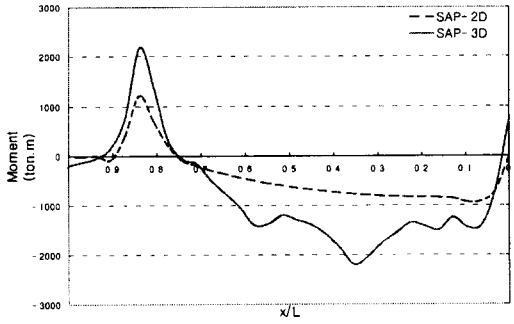

그림 12 Y3 line 전이보 휨모멘트

때문에 3차원 해석과 2차원 해석이 큰 차이가 없으며, X3 line의 경우 해석결과를 보면 그림 4와 같은 지지조건을 설정하는 것이 타당한 것으로 생각된다. X3, X4 line의 2차원 해석결과는 3차원 해석결과에 비해 정모멘트와 부모멘트가 모두 크게 과대 평가되어, 2차원 해석결과로 보의 휨 설계를 하는 것이 3차원 해석에 비해 안전측으로 설계가 가능하다. 그러나 X3 line에서는 2차원 해석 모멘트가 3차원 해석에 비해 최대 4배 정도 과대평가되는 부분도 있는데 그 이유는 2차원 해석에서 지점으로 고려하여 수직방향 변위를 잡아준 전이보가 실제로는 수직방향으로 처짐이 발생하면서 휨모멘트를 감소시켜 주기 때문인 것으로 생각된다. Y3 line의 해석결과를 살펴보면, Y3 line의 경우에는 3차원 해석결과가 2차원 해석결과보다 전체적으로 모멘트가 크게 나오는 것을 알 수 있는데 이는 3차원 해석에서 Y3 line의 전

이보에 걸치는 2개의 X방향 전이보를 통해 작용하는 수직하중의 영향 때문이라고 판단된다. 따라서 X3 line의 전이보가 지나가는 x/L=0.35 지점에서 모멘트가 가장 크게 작용하는 것을 알 수 있다. Y2 line은 2차원 해석결과와 3차원 해석결과가 그림 11과 같이 매우 다르게 나타난다. 그 이유를 명확히 규명할 수는 없지만 아마도 3차원 해석에서 보의 변형은 그림 6과 같지만 2차원 해석에서는 x/L=0.35, 0.77인 지점에 지점을 설정해 보의 변형형태가 달라지게 되며 x방향으로 가로지르는 전이보에 의한 수직하중의 영향으로 인하여 모멘트가 다른 양상을 보이는 것으로 생각된다.

3.3 전이층 벽체의 지압응력 해석결과 비교

전이보 상부벽체의 지압응력을 그림 13에서 그림16에 나타내었다. 그림에서 x축은 보의 스팬

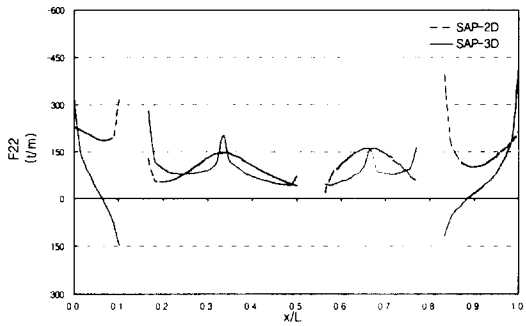

그림 13 X3 line 전이보 상부벽체 지압응력

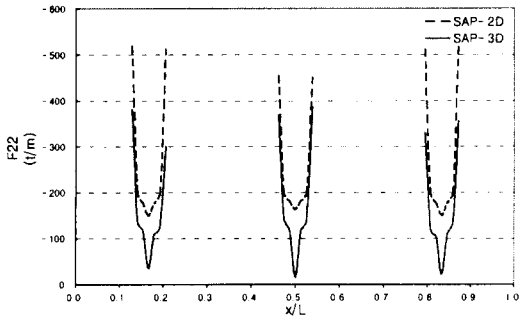

그림 14 X4 line 전이보 상부벽체 지압응력

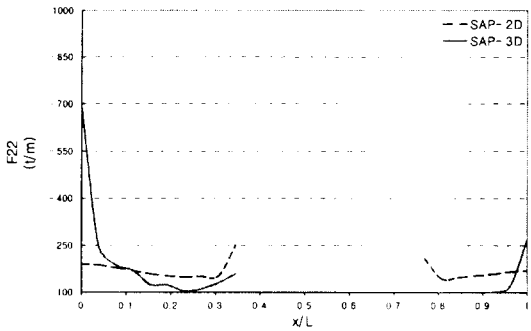

그림 15 Y2 line 전이보 상부벽체 지압응력

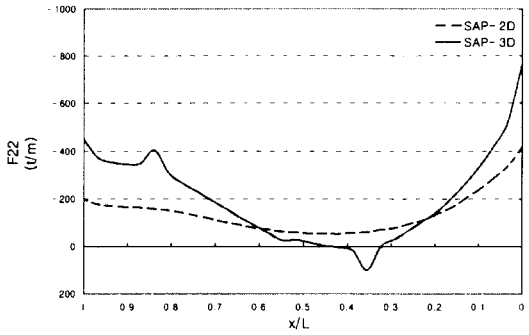

그림 16 Y3 line 전이보 상부벽체 지압응력

에 대해 무차원화하였으며 y축은 지압응력으로 단위는 t/m이다. 각 line에 대한 해석결과를 보면 3차원 해석과 지지조건을 동일하게 한 X4, Y3 Line은 두 해석결과의 지압응력 분포가 비교적 유사하게 나옴을 알 수 있다. 그러나 X3 line은 비대칭 벽체의 단부에서 수직방향 응력이 크게 다르게 나타나는데 이 차이는 주로 전이보의 지점조건의 차이에서 비롯된 것으로 생각된다. X4 line의 지압응력은 두 해석결과가 비슷한 형태를 갖지만 그 값은 전반적으로 벽체 단부에서 2차원 해석의 결과가 크게 나타나며, 지점조건이 동일한 것을 고려하면 이 차이는 2차원 해석에서는 바닥판에 의한 구속효과를 고려할 수 없기 때문에 벽체로의 응력이 집중되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 이러한 수직응력의 분포차이를 감안하면, 실제 벽체설계에서 2차원 해석결과를

가지고 그대로 설계에 반영하는 것에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

4. 3차원 해석결과의 비교(SAP-ETABS)

본 장에서는 중력하중에 대한 널리 이용되는 범용 구조해석 프로그램인 SAP과 ETABS에 의한 하부골조 상부벽식 구조물의 응력해석 결과를 비교해 보고자 한다. ETABS는 일반 건물의 구조해석용 프로그램으로 입력데이터의 작성과 해석, 결과분석 및 해석결과를 설계 직접 적용할 수 있는 등의 장점이 있고, 사용성 및 결과의 신뢰성이 뛰어나 실무에서 많이 사용되고 있다. 그러나 본 구조물과 같이 국부적으로 응력이 집중되는 특수 구조물의 경우에는 해석결과의 신뢰성이 의문시되어, 비교적 정확한 해석결과를 기대할 수 있는 SAP 프로그램에 의한 결과와 비교하고자 한다. ETABS 프로그램에 의한 벽체의 응력의 정확성은 특히 벽체를 구성하는 패널(pannel)의 수에 결정되지만 현실적으로 많은 패널수를 구성하기가 어렵다. 따라서, 본 예제 구조물의 경우 실무에서 수행되는 일반 구조물 해석에서의 모델링방식과 같이 column line을 배치(그림 17)하여 가로 벽체와 세로 벽체가 만나는 모든 격자(grid)의 교점에 column line을 구성하였으며, 패널은 column line에 의해 정의되도록 하였다. 해석결과는 3차원 해석을 통한 일반구조물과 응력분포와 구별되는 전이층 부분에서의 벽체 지압응력과 전이보의 휨모멘트를 기준으로 하여 비교 분석하였다.

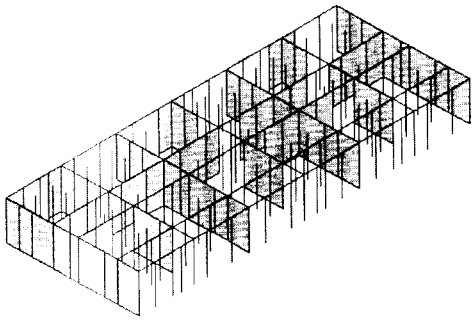

그림 17 ETABS 해석시 벽체 모델링

4. 1 전이층 보의 휨모멘트 비교

SAP의 경우 전이보를 shell요소로 모델링하고 그 해석 결과인 응력을 적분하여 휨모멘트를 구하였다. 또한 ETABS에서는 전이보를 보요소로 모델링하여 비교하였다. 전반적으로 휨모멘트의 경향은 비슷하게 나타나나 그림 18~그림 21에

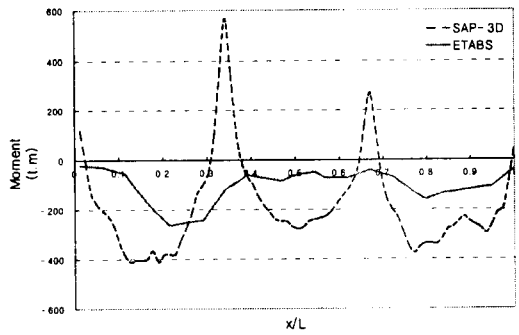

그림 18 X3-line 전이보의 휨모멘트 비교

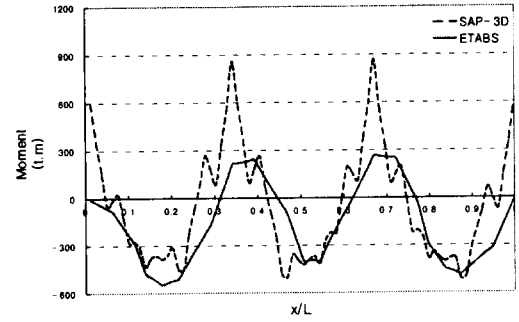

그림 19 X4-line 전이보의 휨모멘트 비교

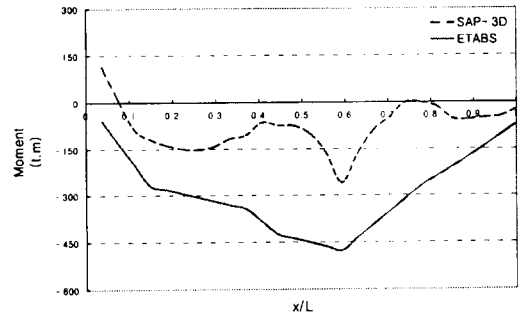

그림 20 Y2-line 전이보의 휨모멘트 비교

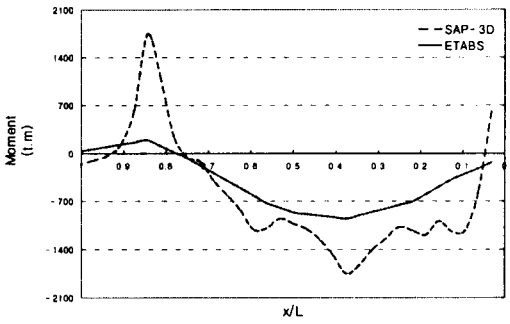

그림 21 Y3-line 전이보의 휨모멘트 비교

서와 같이 그 값의 차이가 크고 특히 모멘트의 경우에 차이가 크게 나타난다. 불연속벽인 X3-line 전이보의 경우 휨모멘트 경향과 그 값의 차이가 상당히 크다. 따라서 ETABS 해석에 따른 응력을 설계응력으로 사용하기는 어렵다.

4.2 전이층 벽체의 지압응력 비교

본 시스템의 경우 상부의 모든 하중은 전이보를 거쳐 기둥으로 전달되고 보와 벽체가 만나는 부분에 수직응력의 아칭(arching)현상이 발생하여 벽체의 지지점 즉 단부에 과도한 수직응력이 발생하게 된다. 따라서 이 부분의 과도한 응력에 의해 벽체 설계에 많은 어려움이 있어왔던 부분이다. 따라서 이 부분에 대한 ETABS 프로그램에 대한 신뢰성 검증과 사용성 평가를 위해 해석결과를 비교 분석 하고자 한다. 전이층 벽체의 지압응력 비교에서 ETABS 벽체의 해석결과는 여러 개의 패널(pannel)요소의 조합인 벽체의 중심에서 하나의 축력과 모멘트로 출력된다. 따라서 두 프로그램에 의한 벽체의 지압응력을 비교하기 위해 편의상 ETABS 결과를 응력(stress) 단위로 환산하였다. 그 과정에서 벽체의 응력은 선형적으로 변화한다는 가정을 하여 ETABS 벽체의 응력은 직선으로 표현되었다. ETABS를 사용한 해석결과 중 벽체의 응력은 하나의 벽체를 구성하고 있는 요소(element) 즉 패널의 수에 의해 응력분포 정확성이 영향을 받게되나, 여기에서는 일반 건물을 ETABS를 이용해 모델링할 때의 일반적인 방법으로 체분(meshing)하도록 하였다. 중력하중에 대한 벽체 단부응력 비교 결과는 ETABS의 결과가 벽체의 지지점에서의 응력 집중현상을 표현할 수 없어 SAP의 결과에 비해 작은값을 가지는 것을 알 수 있다(그림 22~그림 25). 특히 연속벽인 Y3-line의 경우(그림 25), SAP에서는 응력집중 현상이 뚜렷이 나타나

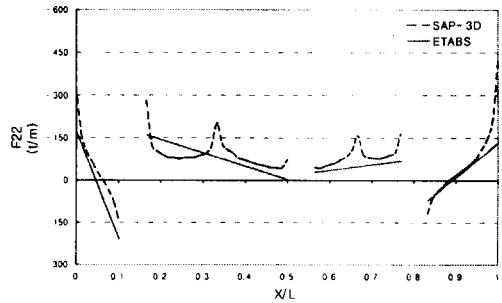

그림 22 X3-line 지압응력 비교

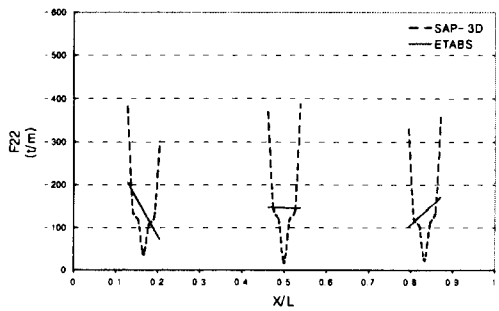

그림 23 X4-line 지압응력 비교

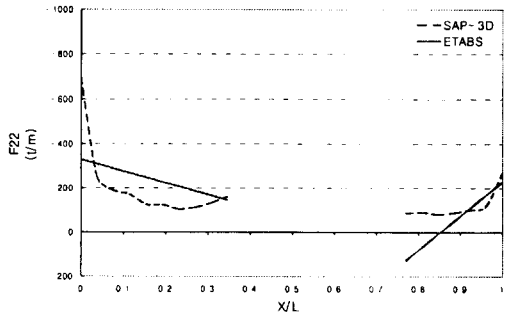

그림 24 Y2-line 지압응력 비교

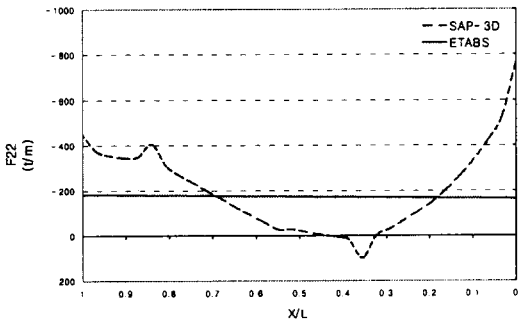

그림 25 Y3-line 지압응력 비교

나 ETABS의 경우 단부 부근의 응력집중 현상을 표현하지 못하고 있다. 이는 ETABS의 경우 벽체 길이에 따른 응력 변화를 단순히 선형화하며, 길이가 긴 벽체를 단순히 몇 개의 요소로만 모델링하는데서 비롯되었다고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 ETABS 모델링 시 벽체 column line의 수직분할은 가능하나 수평요소를 분할할 경우에는 각각의 요소의 경계면에 실제로 존재하지 않는 가상의 층이 구성되어 이들 층들이 강체 슬래브로 가정되는 프로그램 특성상 실제구조물과 다른 형태의 모델링이 구성될 수 있어 해석결과의 신뢰성이 결여된다고 할 수 있다.

5. 3차원 간편해석

상기 고찰한 바와 같이 주상복합 건물은 ETABS에 의한 3차원 응력해석에 의해서는 프로그램의 특성상 전이층의 응력분포를 적절히 나타낼 수 없으며, 2차원 SAP프로그램을 통한 해석에서도 재설계를 위한 정확한 해석결과를 기대할 수 없다. 본 구조 시스템에 대하여 기 연구된 결과에 따르면 연직하중에 대한 전이층의 응력 집중현상(아칭현상)은 벽체의 높이와 길이의 비(H/L)의 비를 1.5 또는 2.0정도이면 구조물을 전체 모델링한 것과 거의 같은 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 절에서는 이를 이용해 그림 26에서와 같이 전체 구조물중 6층까지 만 해석 모델링을 하고 하중은 상에서 전달되는 벽체의 자중을 제외한

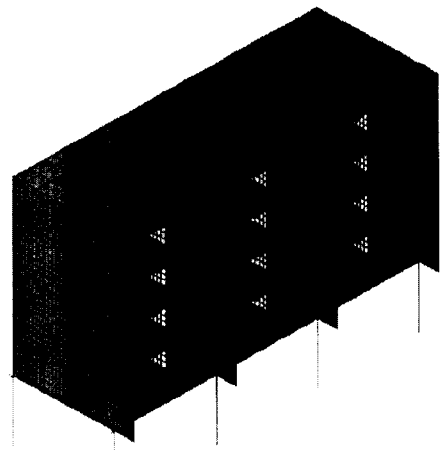

그림 26 3차원 간편해석 모델링

모든 하중을 6층 슬래브 분에 등분포로 작용시키고 상층들의 벽체 자중은 해당 벽체에 재하하여 해석을 수행하였다.

5.1 전이층 보의 휨모멘트 해석결과 비교

두 예제 구조물에 대한 해석 결과 전이보의 휨모멘트는 그림 27~그림 30과 같다. 불연속벽이 존재하는 X3, X4, Y2 line 의 경우 약간의 차이가 발생하나 연속벽인 Y3 line의 연속벽의 경우 휨모멘트의 결과 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 부재를 간이해석에 의한 응력으로 설계를 수행하여도 안전측으로 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

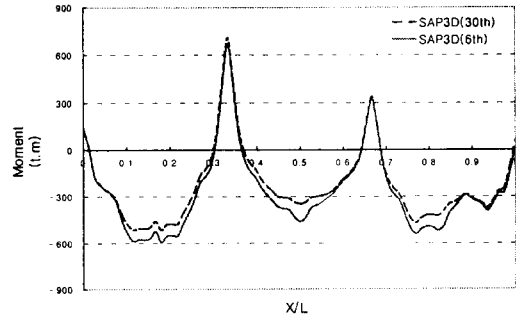

그림 27 X3-line 전이보의 휨모멘트 비교

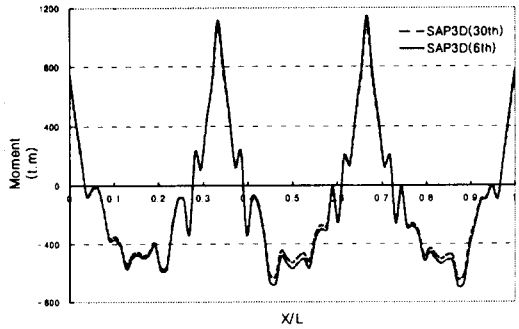

그림 28 X4-line 전이보의 휨모멘트 비교

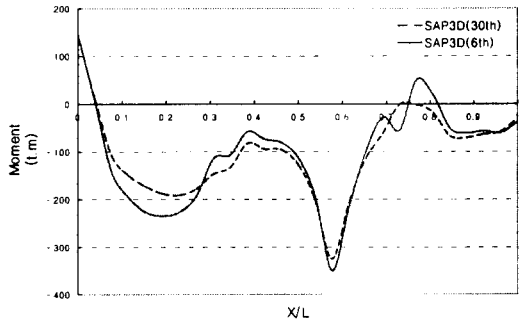

그림 29 Y2-line 전이보의 휨모멘트 비교

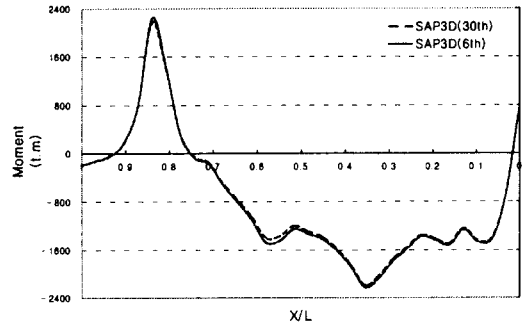

그림 30 Y3-line 전이보의 휨모멘트 비교

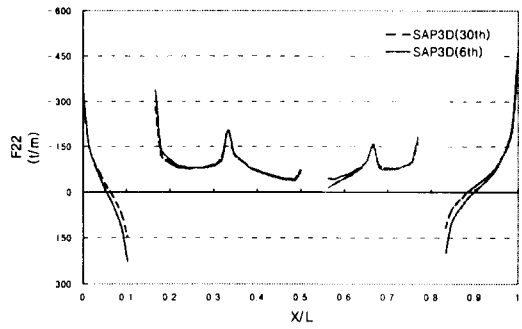

그림 31 X3-line 지압응력 비교

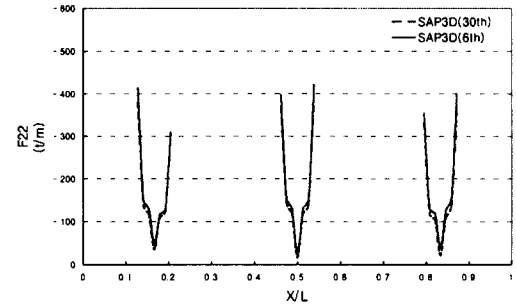

그림 32 X4-line 지압응력 비교

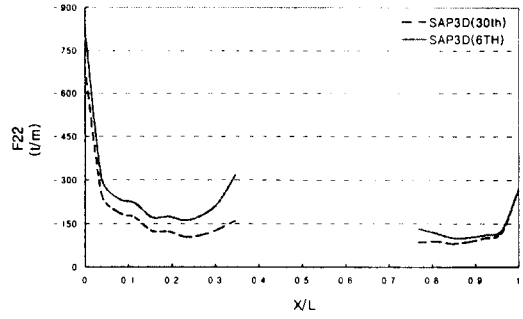

그림 33 Y2-line 지압응력 비교

5. 2 전이층 벽체의 지압응력 해석결과 비교

예제 구조물에서 전체 3차원 모델링한 경우와 6층까지 모델링 한 경우의 전이층 부분에서 벽체의 지압응력을 X2, X3, Y2, Y3 line의 프레임에 대하여 비교하였다. 그 결과 대부분 벽체의 지압응력은 유사한 분포와 벽체단부를 제외한 모든 부분에서의 응력 값들이 많은 차이를 보이지 않으나 대체적으로 6층까지 모델링한 경우에 벽체단부의 최대 지압응력 값들이 전체 모델링의 경우와 비교했을 때 약 20%정도 크게 나타났다. 그러나 연속벽인 Y3 line(그림 34) 프레임의 경우 응력의 차

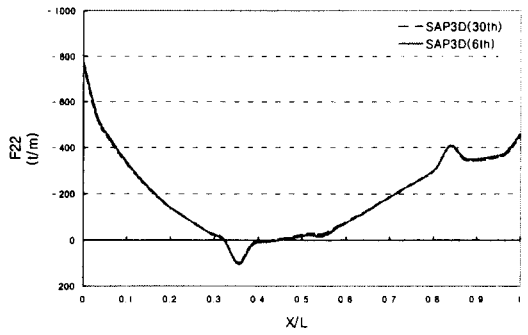

그림 34 Y3-line 지압응력 비교

이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 전체 구조물을 대상으로 해석한 결과보다 전반적으로 6개층만 모델링한 경우가 약간 크게 나오므로 6개층만의 해석결과를 이용할 경우 안전측으로 설계가 가능하다.

6. 결 론

1) 2차원 해석과 3차원 해석결과 비교(SAP)

- 2차원 해석시 전이보가 기둥과 직접 연결되지 않은 line은 지지조건의 설정에 따라 3차원 해석 결과와 큰 차이가 발생하므로 지지조건의 설정에 주의할 필요가 있다. 그러나 2차원 해석에서 실제적으로 적용 가능한 지점조건은 힌지나 고정단만이 존재하므로 실제 구조물의 지점조건을 정확히 구현하기 어려워 해석 결과의 오류가 발생한다.
- 전이보의 휨모멘트는 X3, X4 line에서는 비교적 두 해석결과가 유사하나 Y2, Y3 line의 경우에는 3차원 해석의 결과가 더 크거나 모멘트의 형태가 다른 양상을 나타내어 2차원 해석결과로 전이보를 설계하는 데에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 이러한 차이는 앞에서 언급한 지지조건의 설정과 해석 line을 가로질러 지나가는 다른 전이보에 의한 효과 등이 포함되어 발생하는 것으로 장변방향의 전이보에서 단변방향 전이보의 효과보다는 단변방향의 전이보를 해석할 때 장변방향 전이보의 효과가 더 크게 작용하여 Y line 해석의 결과가 더 정확한 것으로 생각된다.
- 전이보 상부벽체의 지압응력에 대한 검토결과 2차원 해석과 3차원 해석결과는 상당한 차이를 나타내었다. 이는 2차원 해석에서는 3차원 모델의 직교방향 전이보의 영향, 전이보 위의 비대칭 전단벽체 및 슬래브의 영향 등을 표현할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.
- 건물 강성중심이 비대칭일 경우 구조물을 2차원으로 단순화하여 해석하는 경우 전체 건물의 강성차이에 의한 구조물의 변형을 각각의 프레임 해석시 이를 적절히 고려할 수 없으므로 실제 해석결과와 차이가 발생할 수 있다.

2) 3차원 SAP 해석과 3차원 ETABS 해석결과 비교

- 전이층 휨모멘트의 경우 ETABS와 SAP의 결과가 비슷한 경향을 보이나 그 절대치에 있어서는 많은 차이를 보이며 특히, 불연속벽의 경우 그 차이가 커 본 구조시스템의 해석에 ETABS프로그램을 이용하는데는 문제가 있다고 판단된다.
- 전이층 벽체의 지압응력의 경우 ETABS는 벽체의 해석결과를 여러 개의 패널 요소의 조합인 하나의 벽체 중심에서의 축력과 모멘트로 출력되어 벽체 단부의 국부적인 응력집중효과를 제대로 반영할 수 없으므로 그 결과를 설계에 이용하기에는 무리가 있다고 판단된다.
- ETABS의 경우 응력이 집중되는 전이층의 응력분포를 표현하기 어렵다. 본 구조물의 경우 응력이 집중되는 전이층의 경우 많은 패널요소를 필요로 하나 현실적으로 많은 패널요소로 벽체를 모델링하기 어렵다.

3) 간편 3차원 해석과 전체 3차원 해석결과 비교(SAP)

- 전이층 벽체의 지압응력과 전이보의 해석결과 간편 3차원 해석의 경우 정밀해석에 비해

응력이 집중되는 벽체의 단부와 보의 중앙부에서 최대 약 20%정도 크게 평가되나 이는 전체 모델링한 경우와 비교했을 때 안전측에 속하고 전반적으로 유사한 응력분포를 보인다. 따라서 간편 3차원 해석에 의한 해석 및 부재 설계가 가능하다고 판단된다.

- 간편 3차원 해석에 의한 본 구조시스템을 해석할 경우 전체 모델링에 따른 입력데이타 작성의 번거로움과 해석 시간을 절약할 수 있으며, 또한 해석결과의 분석이 용이한 장점이 있다고 할 수 있다.