

유한요소법을 이용한 주상복합건물의 강막작용에 의한 영향 평가

Evaluation of Diaphragm Effect for Hybrid Structural Systems Using Finite Element Method

김 희 철* 최 성 우* 홍 원 기**
Kim, Hee-Cheul Choi, Seong Woo Hong, Won-Kee
(논문접수일 : 2002년 3월 7일 : 심사종료일 : 2003년 2월 24일)

요 지

주상복합건물의 구조시스템은 휨변형에 의해 횡력에 저항하는 전단벽 구조와 전단변형에 의해 저항하는 라멘구조의 복합구조로 이루어져 있으며, 이 두 구조의 원활한 힘의 전달을 위하여 전이층에 주로 춤이 큰 보를 사용한다. 주상복합건물은 이러한 큰 질량과 강성을 갖는 전이층으로 인하여 유한요소법에 의한 해석 시 동적 해석을 수행하여야 하며, 일반적인 해석 절차로는 해결하기 어려운 많은 문제점을 야기한다. 일반적으로 주상복합건물의 해석시 전이층 바닥판은 강막을 적용하거나 판요소로 직접 입력하나 적절한 평가없이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강막 적용에 따른 영향을 평가하여 올바른 해석 방법을 제시한다.

핵심용어 : 주상복합건물, 전이층, 춤이 큰 보, 강막작용

Abstract

The structural system of a hybrid building is composed of upper shear wall which resist lateral force by bending deformation and lower frame which resist lateral force by shear deformation. A deep transfer girder is used to transfer gravity load safely from super structures to structural frame beneath. Because of the vertical discontinuity, a building with transfer girder must be analyzed by dynamic analysis. However, this structural system has many problems in performing dynamic analysis that cannot be solved by general analysis procedure. The slabs in transfer floor are considered as either a plate element or a rigid diaphragm in finite element analysis without appropriate evaluation of their characteristics. Therefore, a reasonable analysis method is proposed in this study by evaluating the diaphragm effect of a hybrid structure system.

Keywords : hybrid building, transfer girder, deep beam, diaphragm action, finite element method

1. 서 론

도심의 주거공간을 개선하고 부족한 대지를 효율적으로 활용하기 위해 주상복합건물이 많이 건설되고 있다. 또한 경제성을 앞세운 친환경적인 평면형태에서 벗어나 개인의 개성 및 상황에 맞는 다양하고 편리한 주거공간의 연출이 요구되어 고층아파트 하부를 개방공간으로 하거나 주차

공간으로 구성하는 사례가 늘고 있다. 이러한 복합용도의 건물은 우리나라 특성상 상부는 주거공간으로 사용되고 하부는 상가 또는 주차공간으로 이용된다.

일반적인 주상복합건물의 구조시스템은 휨변형에 의해 횡력에 저항하는 전단벽구조와 전단변형에 의해 저항하는 라멘구조의 복합구조로 형성되는데, 이 두 구조의 원활한 힘의 전달을 위하여 매우 큰 단면을 가지는 전이보(Transfer

* 책임저자, 정회원 · 경희대학교 건축공학과 부교수
전화: 031-201-2542; Fax: 031-202-2107

E-mail: kimhc@khu.ac.kr

* 경희대학교 건축공학과 석사

** 경희대학교 건축공학과 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2003년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 2003년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

girder)나 두꺼운 바닥판으로 된 전이판(Transfer slab) 등을 사용한다. 이러한 주상복합건물은 전이층(Transfer floor)이 인접한 층에 비해 질량과 강성이 매우 크게되므로 반드시 동적 해석을 할 필요성이 있는 수직적인 비정형 건물이다. 이러한 특성을 가진 주상복합건물은 일반적인 해석 절차로는 해결하기 어려운 많은 문제점을 내포하고 있으나, 이에 대한 해석기법 및 설계기법이 제대로 정립되지 못한 실정이다.

주상복합건물을 유한요소법으로 구조 해석할 때에는 다음과 같은 몇 가지 문제를 해결해야만 해석 오차를 감소시킬 수 있다.

첫째, 요소 종류의 선택이다.

전이보 및 전이보에 연결된 전단벽을 요소 선택에 따라 해석 결과에 많은 차이를 보이고 있다. 유한요소법에서 사용하고 있는 요소의 종류로는 보요소, 판요소, 평판요소, 벽요소, 입체요소 등이 있다. 일반적으로 현재 실무를 수행하고 있는 구조사무소에서는 전체 모델의 경우 전이보는 보요소로, 전단벽은 벽요소로 해석하며 상세 구조해석을 할 경우에는 전이보와 전단벽을 판요소로 모델링하고 있다.

둘째, 해석 방법에 대한 결정이다.

주상복합건물을 해석할 때 일반적으로 전이층을 중심으로 상부층과 하부층을 분리하여 모델링한 후 상부층의 해석결과에 따른 반력을 하부층의 하중으로 입력하여 해석하는 분리모델 해석법과 전체 건물을 분리하지 않고 해석하는 결합모델 해석법이 있는데, 결합모델 해석법이 전이층의 동적 특성을 반영할 수 있어 정해에 가까운 해석법이라 할 수 있다. 그러나 결합모델 해석법은 입력 작업이 어렵고 요소수가 많아져 해석시간이 길어지는 단점이 있다.

주상복합건물을 유한요소법으로 해석할 때에는 위와 같은 오차 발생요인 외에도 해석을 간단히 하기 위해 많은 가정을 하기 때문에 오차가 발생하는데, 그 중 하나가 강막작용(Rigid Diaphragm Action)이다. 바닥판을 강막(Rigid Diaphragm)으로 간주하고 골조해석을 하면 모델에 대한 입력이 간단하고 해석시간을 단축하는 이점이 있다.

건물 해석시 강막을 적용할 수 있는 이유는 건물이 횡력을 받을 때 바닥판의 강성이 기둥 및 전단벽 등의 수직하중 전달부재의 강성에 비해 매우 커서 바닥판의 면내 변형이 건물의 횡변형에 비해 매우 작기 때문이다. 따라서 유한요소법으로 건물을 해석할 때 바닥판을 직접 입력하는 대신 바닥판의 면내 거동 및 면의 법선방향의 회전 거동을 무시하고 요소의 자유도를 줄여 해석을 간단히 한다.

그러나 이와 같은 해석방법은 전이층의 질량 및 강성이 인접 층에 비해 매우 큰 주상복합건물에서는 다른 건물들과 달리 큰 오차가 발생할 수 있다. 현재 구조 설계사무소

에서는 주상복합건물의 유한요소해석시 전이층 바닥판을 판요소나 평판요소로 직접 입력하기도 하나 바닥판이 강막작용을 한다고 간주하고 이를 적용하여 입력을 간단히 한다. 그러나 강막작용이 전이보나 벽체에 어떤 영향을 주는 지 적절한 평가가 없이 사용되고 있다.

따라서 본 논문에서는 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS GEN을 이용하여 강막작용이 적용된 해석모델과 바닥판을 판요소로 보고 해석한 모델을 비교하여 강막작용이 보와 벽체에 미치는 영향을 분석한다. 또한 효율적인 해석기법을 찾아 이들 부재의 경제적 설계를 유도하는데 그 목적이 있다.

2. 강막작용에 대한 이론적 배경

2.1 강막작용의 정의

건물이 지진 또는 바람에 의해 횡력을 받을 때 바닥판 내의 모든 위치에서의 횡방향 상대 변위는 수직하중 전달 구조부재(기둥, 벽체 등)의 횡방향 변위에 비하여 거의 무시할 만큼 작다. 따라서 바닥판을 강체로 가정하고 바닥판 내의 모든 면내거동을 상호 구속함으로써 바닥판의 강막작용을 골조해석 시 고려할 수 있다. 이때 면내거동은 바닥판의 면내 선변위 2개의 성분과 면의 수직방향에 대한 회전 변위성분이다.

그림 1에 보인 바와 같이 기둥의 강성에 비해 바닥판의 강성을 무한히 큰 강체로 가정할 경우 바닥판의 면내거동은 무시됨으로써 δ_1 과 δ_2 는 거의 같은 값을 가지게 된다.

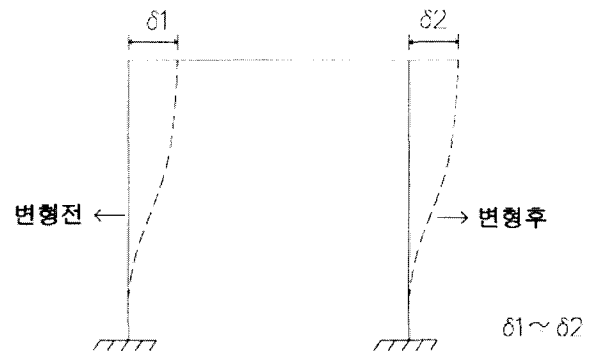
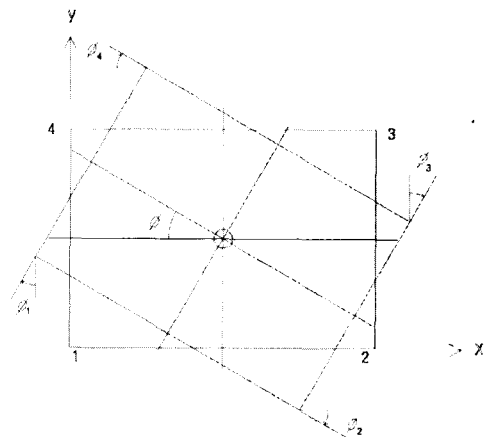
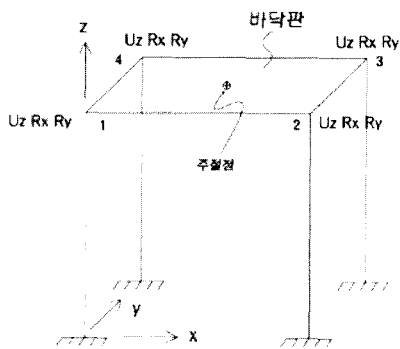
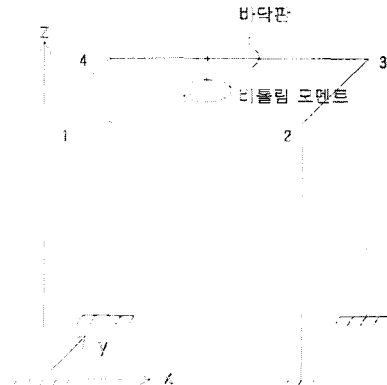
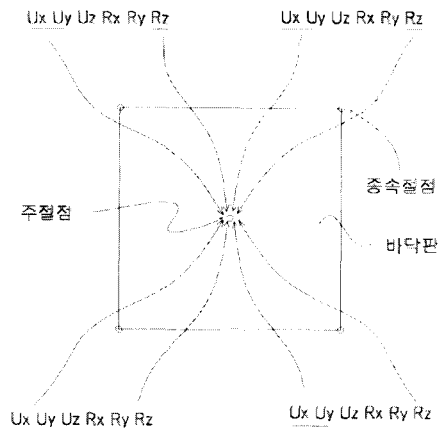


그림 1 횡력 작용 시 바닥판이 있는 구조물의 거동

2.2 강막작용의 적용 방법³⁾

같은 층 내의 모든 절점의 X, Y방향의 변위 자유도 및 Z축의 회전변위 자유도는 주절점에 구속함으로써 같은 층 내의 모든 절점의 변형은 주절점의 변형에 따른 상대적 값으로 치환된다. 이 때 주절점은 질량중심에서 자동 생성되거나 원하는 위치에 직접 입력할 수 있다.



- U_x : 해당 절점의 X방향 변위자유도
- U_y : 해당 절점의 Y방향 변위자유도
- U_z : 해당 절점의 Z방향 변위자유도
- R_x : 해당 절점의 X방향에 대한 회전변위자유도
- R_y : 해당 절점의 Y방향에 대한 회전변위자유도
- R_z : 해당 절점의 Z방향에 대한 회전변위자유도

그림 2 바닥판의 자유도 축약 개념도

그림 3 구조물이 비틀림모멘트를 받을 때의 거동

기구학적 구속기능을 이용하여 자유도를 축약시키게 되면 해석소요시간을 단축시키는 데도 상당히 효과적이다. 가령 건물의 구조해석시 바닥판을 판요소(또는 평면응력요소) 등으로 모델링하면 층 당 수많은 절점이 필요하게 된다. 이 경우 횡방향 자유도만 고려해도 절점개수×3만개의 자유도 수가 증가하기 때문에 몇 개 층만 모델링하더라도 구조해석 프로그램의 해석능력을 초과하거나 해석이 가능하더라도 상당한 시간이 소요된다. 일반적으로 해를 구하는데 소요되는 시간은 자유도수의 세제곱에 비례하기 때문에 해의 정확도를 크게 떨어뜨리지 않는 한도 내에서 자유도수를 줄이는 것이 효과적이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 바닥판이 있는 단층구조물이 비틀림모멘트를 받을 때 바닥판의 면내강성이 수직기둥부재의 강성에 비해 무한히 클 경우 바닥판 전체가 ϕ 만큼 회전하게 되고 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \phi$ 이다. 따라서 4개의 자유도를 1개의 자유도로 축약시킬 수 있다.

또한, 그림 4에서 보는 바와 같이 강막작용을 하는 바닥판에 횡력에 의한 평면방향변위 및 회전변위가 동시에 발생하였을 경우 바닥판 내의 임의의 점에서의 변위는 식(1)에 의해 계산된다.

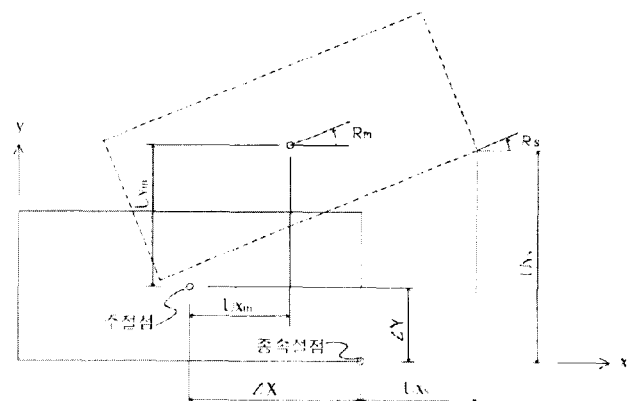


그림 4 바닥판(강막)이 횡력에 의해 평면방향 변위 및 회전변위가 동시에 발생할 때의 거동

$$\begin{aligned}
 U_{xs} &= U_{xm} - R_m \times \Delta Y \\
 U_{ys} &= U_{ym} - R_m \times \Delta X \\
 R_s &= R_m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2.3 강막의 변환행렬

일반적인 건물은 각 층마다 바닥판이 배치된다. 따라서

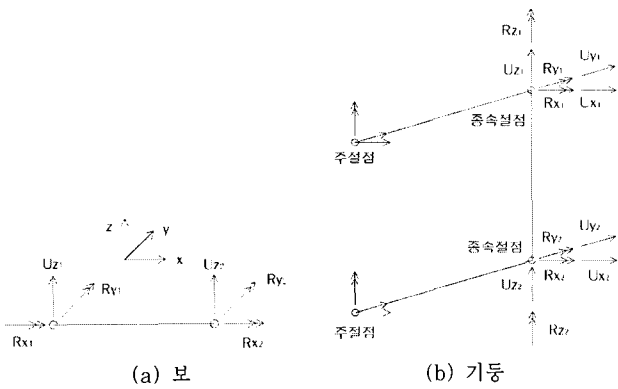


그림 5 강막작용하는 바닥판내의 보의 자유도와 기둥의 자유도

바닥판의 영향을 골조해석에 포함해야만 정확한 해석이 가능하다. 바닥판의 영향을 골조해석에 포함하는 방법으로는, 1) 바닥판의 면내에는 무한한 강성을 가지고 있고 평면의 법선방향에는 유연한 거동을 하는 강막으로 가정하는 방법과 2) 바닥판을 판이나 평면요소로 직접 입력하는 방법이 있다.

강막을 적용한 모델의 경우 평면 내에 위치한 보는 면외에 작용하는 하중만을 분담하는 것으로 보고, 그림 5(a)와 같이 부재에 6개의 자유도만을 가지고 있는 것으로 가정할 수 있다. 즉 절점당 6개의 자유도 중 강막가정에 의한 자유도의 구속과 관련된 3개의 자유도는 강막에 대한 자유도 변환을 수행할 필요가 없게 된다.

반면에 보요소인 기둥의 자유도는 그림 5(b)와 같이 절점당 6개의 자유도를 모두 포함하여 강막에 대한 자유도 변환을 수행한다. 그림 5(b)에서 기호 R_{x1} , R_{y1} , U_{z1} 은 위층 바닥판의 강막작용과 직접 연관되지 않는 절점자유도에 해당하는 부분이다. 기호 R_{x2} , R_{y2} , U_{z2} 는 아래층의 자유도로서 바닥판과 무관한 부분이다. 반면에 상부의 U_{x1} , U_{y1} , R_{z1} 과 하부의 U_{x2} , U_{y2} , R_{z2} 는 각 층의 강막작용과 연관된 부분의 자유도이다.

보요소인 기둥의 강성행렬은 K_{ij} (12×12)의 행렬로 나타낼 수 있다. 이 강성행렬을 주절점에 대한 강성행렬로 변환하기 위해서는 식(2)를 이용하여 계산한다.

$$K_M = T^T K T \quad (2)$$

또한 하중도 주절점에 대한 하중으로 치환해야만 올바른 해석이 가능하므로 식(3)에 의해 주절점에 대한 하중으로 변환시킨다.

$$F_M = T^T F \quad (3)$$

위와 같은 주절점에 대한 강성과 하중을 이용하여 식(4)에 의해 주절점에 대한 변위를 구한다.

$$F_M = K_M D_M$$

$$D_M = K_M^{-1} F_M \quad (4)$$

식(4)에 따라 구한 주절점의 변위를 이용하여 종속절점의 상대적 위치에 따라 종속절점의 변위를 구하게 된다.

3. 강막작용에 대한 기준

3.1 주상복합건물에서의 강막작용

지진하중 또는 풍하중이 구조물에 작용할 때 이 하중을 안전하게 지면에 전달하기 위해서는 수직, 수평저항 요소들이 기초부터 상부까지 연속적으로 구성되어 하중경로를 제공하여야 한다. 주상복합건물의 경우 수직요소는 상부층에서는 전단벽으로, 하부층에서는 기둥으로 구성되며 수평요소는 상부층에서는 바닥판으로, 하부층에서는 바닥판과 보로 구성된다. 이 때 바닥판은 수직요소의 강성에 따라 횡력을 분배한다.

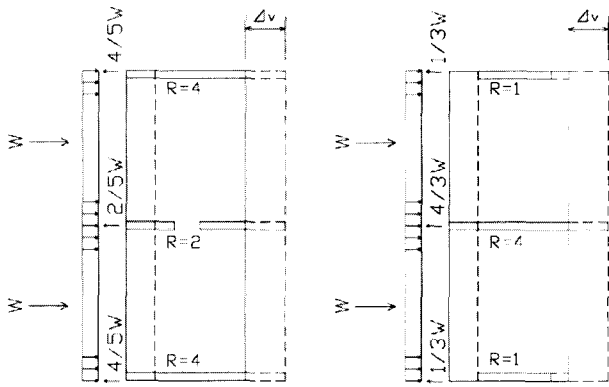
상부층의 전단벽 구조는 지진 또는 바람에 의한 횡력을 받을 때 힘의 방향과 평행한 전단벽만 유효한 것으로 보고 설계한다. 또한 각층의 바닥판은 층전단력을 하부층으로 전달할 수 있는 능력을 지녀야 한다. 특히 전단벽이 층에 따라 수직적으로 일치하지 않을 경우와 바닥판에 개구부가 많은 경우 상부층의 응력을 하부층의 전단벽으로 안전하게 전달하기 위해서는 바닥판의 역할이 중요하므로 구조설계자는 필요에 따라 바닥판의 응력을 점검해야 한다. 바닥판은 수직요소의 강성과 비교하여 강성에 따라 유연막 또는 강막으로 구분한다.

3.2 조직조에서의 강막작용⁵⁾

강막의 강성은 횡력을 전단벽으로 분배시키는데 영향을 주나 실제적으로 무한히 견고하거나 유연하지 않다. 하지만 해석을 위해 강막을 Rigid, Semi-rigid, Flexible 3개의 그룹으로 분류한다.

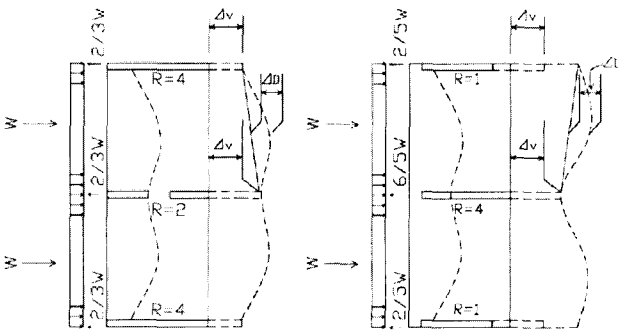
Rigid Diaphragm은 그림 6과 같이 수직저항요소의 상대적인 강성에 따라 횡력을 분배한다고 가정한다.

Semirigid Diaphragm은 횡력을 받을 때 바닥판에 변형이 발생하며 또한 수직저항요소의 강성에 따라 수직저항요소로 횡력을 분배할 수 있는 충분한 강성도 가지고 있다. 그 거동은 그림 7과 같이 항복한 지지부재에 약간의 강성을 가지고 있는 연속보의 거동과 유사하다. 지지하는 부재의 반력은 강막과 수직저항요소의 상대 강성에 따라 달라진다.



R = RELATIVE RIGIDITY
 Δ_v = DEFLECTION OF VERTICAL ELEMENT

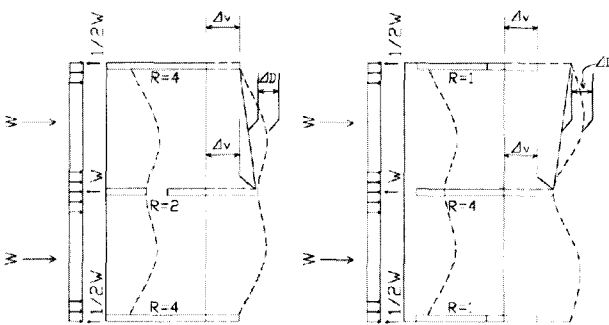
그림 6 Rigid Diaphragm의 횡력 분배



R = RELATIVE RIGIDITY
 Δ_v = DEFLECTION OF VERTICAL ELEMENT
 Δ_D = DEFLECTION OF DIAPHRAGM

그림 7 Semirigid Diaphragm의 횡력 분배

Flexible Diaphragm은 그림 8과 같이 지지부재사이에 전단 변형을 하는 연속보와 같은 거동을 한다. 지지부재는 항복하지 않은 것으로 고려되며 강막의 강성에 비해 수직 저항요소의 상대 강성이 크다. 따라서 Flexible Diaphragm은 횡력의 분포 면적에 따라 횡력을 수직저항요소로 분배하는 것으로 가정한다.



R = RELATIVE RIGIDITY
 Δ_v = DEFLECTION OF VERTICAL ELEMENT
 Δ_D = DEFLECTION OF DIAPHRAGM

그림 8 Flexible Diaphragm의 횡력 분배

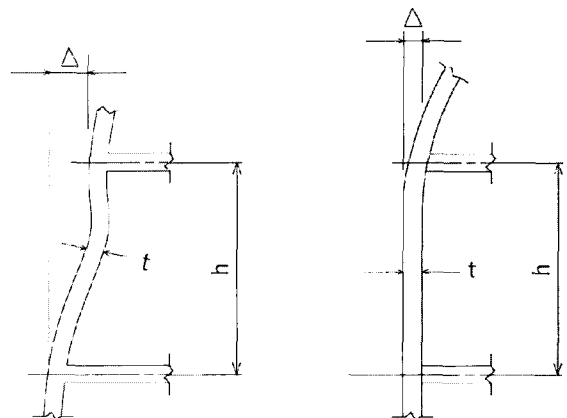
Rigid Diaphragm, Semirigid Diaphragm은 비틀림에 의한 힘이 상대적인 강성과 강성중심의 거리에 비례하여 전단벽으로 분배되는 것으로 생각하나 Flexible Diaphragm은 비틀림 응력을 분배하는 능력이 없다고 생각한다. Rigid Diaphragm을 고려하여 상대적인 강성에 따라 수직저항요소로 횡력을 분배할 때 전단벽의 상대 강성은 전단변형과 휨변형에 따라 달라진다. 그러나 대부분의 고층건물의 전단벽의 높이(H)/길이(L) 비에서 휨변형이 전단변형을 크게 초과하므로 휨강성만이 전단벽의 상대적인 강성을 결정하는 것으로 생각한다.

전단벽으로 횡력을 분배하는 것에 대한 정밀 해석은 종종 매우 많은 시간을 소비하거나 정확하지 않은 결과가 나온다. 그러므로 설계할 때 합리적인 간략한 방법을 사용한다. 예를 들어 강막을 rigid로 보고 해석한 다음 Flexible로 해석하여 횡력을 분배한 후 그 결과의 차이가 크지 않다면 안전하게 최대값을 설계에 적용하는 것이다.

강막의 설계 시 변형(Deflection) 또한 고려되어야 한다. 그림 9와 같이 강막의 변형은 전단벽에 수직인 벽체에 초과 응력이 발생하지 않도록 제한돼야 한다. 다음 식(5)는 조적 벽체나 콘크리트 벽체를 가지고 있는 건물에 대한 강막의 허용 변형을 Structural Engineers Association of Southern California(SEASC)에서 제안한 것이다.

$$\Delta = \frac{h^2 f}{0.01 E t} \tag{5}$$

여기서 Δ =벽체의 인접 지지부재간의 허용변형(inch), h =인접한 횡지지부재 사이의 벽체 높이(feet), t =벽체 두께(inch), f =벽체의 허용 휨압축응력(psi), E =벽체의 탄성계수(psi)를 각각 의미한다.



Note : Shape of deflected wall depends on restraint at supports.

그림 9 강막의 변형

표 1 바닥 또는 지붕 diaphragm의 길이에 대한 춤의 최대비율

Floor or roof Diaphragms construction	Maximum span to width(depth) ratio of diaphragm
Cast-in-place concrete	5:1
Precast concrete	4:1
Metal deck with concrete fill	3:1
Metal deck with no fill	2:1
Wood diaphragm	2:1

강막의 최대 간격(Span) · 폭(Width or Depth)비를 사용하여 강막의 변형을 간접적으로 제어한다. 만약 강막이 적절한 비로 설계된다면 강막의 변형은 허용변형 내로 제한할 수 있다. 표 1은 International Building Code 2000에서 제시한 제안값이다.

3.3 International Building Code 2000⁴⁾

3.3.1 강막(rigid diaphragm) 및 유연막(flexible diaphragm)의 정의

수직저항요소로 층전단력과 비틀림모멘트를 분배시킬 때 강막(diaphragm)의 면내 최대 횡변형이 연속된 층간의 수직저항요소의 평균층변위보다 2배 이상 크면, 그 강막은 유연(flexible)하다고 하며, 그렇지 않은 강막은 단단(rigid)하다고 한다.

3.3.2 지진 설계 범위 D에서의 강막의 허용 변형(Deflection) 및 설계하중

강막의 면내 변형이 강막에 붙어 있는 요소의 허용 변형을 초과하지 않아야 한다. 허용 변형은 강막에 붙어 있는 요소가 개별하중 하에서 구조적으로 온전함을 유지할 수 있고, 규정된 하중을 계속적으로 지지할 수 있을 때까지의 변형이다.

층과 지붕층의 diaphragm은 다음 하중에 저항할 수 있도록 설계되어야 한다.

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^n F_i}{\sum_{i=x}^n \omega_i} \omega_{px} \quad (6)$$

여기서 F_i =i층에서의 설계력, F_{px} =강막의 설계력, ω_i =i층에 종속적인 무게, ω_{px} =x층의 강막에 의한 무게를 각각 의미한다.

식(6)에 의해 계산된 힘은 $0.3S_{DS}I_E \omega_{px}$ 를 초과할 필요는 없으나 $0.15S_{DS}I_E \omega_{px}$ 보다 작아서는 안 된다. 여기서

S_{DS} =짧은 주기에서의 설계 가속도 응답스펙트럼, I_E =중요도계수를 각각 의미한다.

수직저항요소의 위치가 offset되거나 횡강성의 변화로 강막 위의 수직저항요소로부터 강막 아래의 다른 수직저항요소로 설계지진력이 전이되어야 할 경우, 이 전이되는 힘이 위의 공식과 상, 하한의 제한값에 추가되어야 한다.

4. 예제 모델 해석

4.1 MODEL I (정형, 대칭)

4.1.1 건물 개요

- 1) 구조 : 철근 콘크리트 구조
- 2) 층고 : 1층(4200), 2층(5600), 3층~20층(2700)
- 3) 단면가정 및 적용 요소(단위: mm)
 - (1) 기둥 : 보요소(1200×1200)
 - (2) 전이보 : 보요소(1200×2100)
 - (3) 전이층 바닥판 : 판요소(THK.=300)
 - (4) 전단벽 : 벽요소(THK.=200)

4.4.2 설계하중

- 1) 중력하중 : 기준층 고정하중 : 570kg/m²
적재하중 : 200kg/m²
- 2) 지진하중 : 지역계수(0.11), 중요도계수(1.5)
지반계수(1.0), 반응수정계수(3.0)
- 3) 하중 조합(풍하중은 고려하지 않음)

하중은 총 17 종류의 하중조합에 대한 검토가 이루어졌다. 하중의 종류가 증가한 이유는 횡방향 하중의 X 방향에 의한 영향과 Y 방향에 의한 영향을 분리하여 각각의 방향에 대한 영향을 고려하였기 때문이다. 또한 본 연구에서는 지진하중에 의한 영향만을 고려하였으며 풍하중에 의한 영향은 고려하지 않았다.

4.4.3 전이층 평면도

그림 10은 본 연구에 사용된 정형, 대칭의 건물에 대한 평면도를 나타내고 있다.

4.4.4 해석 결과

1) 변위

주상복합건물 MODEL I에서 M-N-11은 전이층을 강막으로 입력한 모델이고, M-N-12는 전이층을 판 요소로 정밀한 격자(격자수 : 1600개, 격자크기 : 50×50cm)로

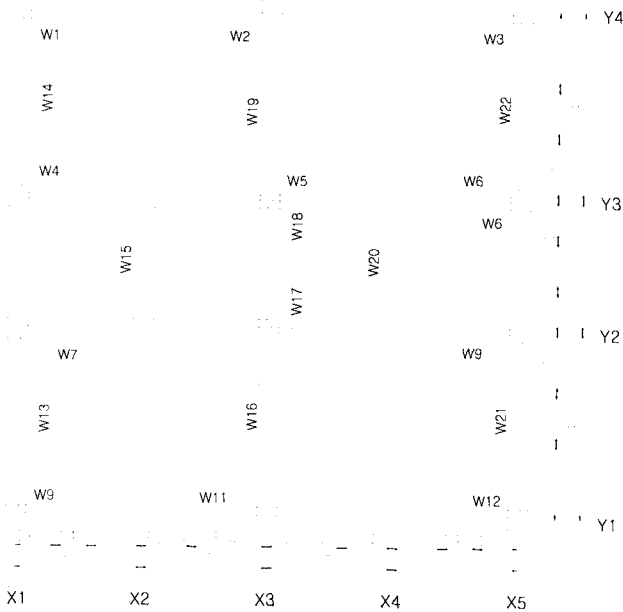


그림 10 MODEL I (정형, 대칭) 전이층의 구조평면도

분할하여 입력한 모델이며, M-N1-12는 전이층과 전이층 상부층(2개층)을 판요소를 사용하여 정밀한 격자(격자수 : 1600개, 격자크기 : 50×50cm)로 분할하여 입력한 모델이다. M-N2-12는 전이층을 판요소로 성긴 격자(격자수 : 100개, 격자크기 : 최대 300×300cm, 최소 100×140cm)로 분할하여 입력한 모델이다.

MODEL I의 해석결과에서 나타난 변위를 보면 중력 및 횡력작용시 강막모델(M-N-11)과 성긴 판요소모델

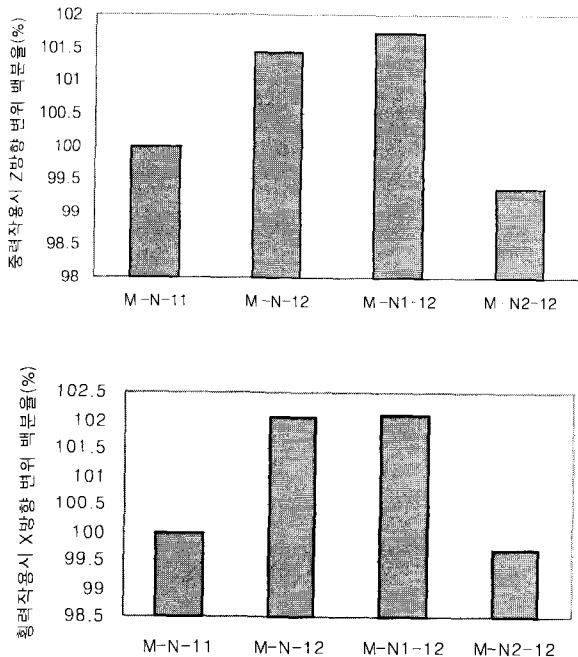


그림 11 변위 백분율

(M-N2-12)의 거동은 대체적으로 유사하여 두 모델간 오차율이 최대 0.64%로 거의 일치하나 정밀한 판요소 모델들과는 오차율이 중력작용시 Y방향에서 최대 13.55%로 확대되었다. 그러나 그 크기가 절대적으로 작으므로 이를 무시하여도 그림 11에서와 같이 정밀한 판요소모델의 오차율이 조금이나마 확대됨을 알 수 있다.

또한 성긴 판요소모델의 변위는 중력 및 횡력 모두 강막 모델에 비해 감소하였으나 정밀한 판요소모델은 증가하였다. 그러나 전체 모델에서 절대값에서 각 방향의 변위가 대체적으로 일치했다. 여기서 백분율이란 강막모델을 기준으로 100%로 정할 때 다른 모델과의 비율이며 오차율은 강막 모델 백분율에서 판요소모델의 백분율을 뺀 값을 말한다.

2) 전이부 부재력

MODEL I (정형, 대칭)의 강막모델과 성긴 판요소모델의 변형이 거의 일치함에도 불구하고 부재력에서는 오차율이 크게 증가하여 중력작용시 전단력에서 오차율이 최대 23.1%로 나타났다. 그러나 정밀한 판요소 모델들과는 횡력작용시 전단력에서 7.0%로 최대 오차율이 발생하여 대체적으로 비슷한 값을 보였다. 또한 중력 및 횡력 모두에서 전단력의 오차율이 모멘트의 오차율보다 증가하는 경향을 보여 주었다.

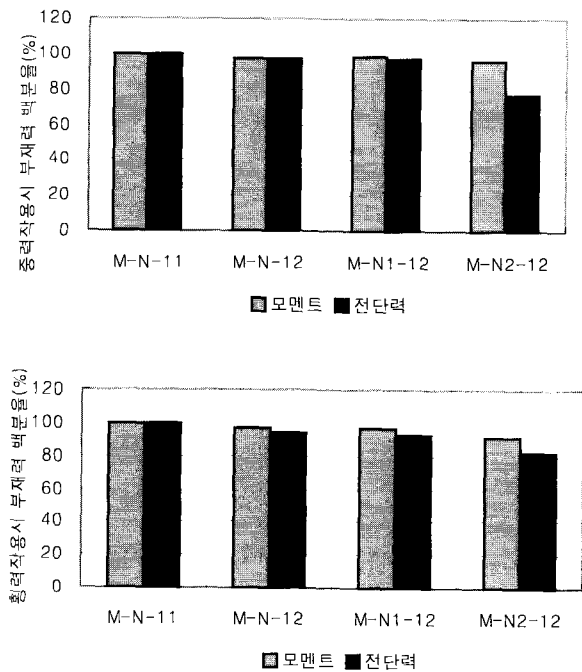


그림 12 전이부 부재력 백분율

3) 전이층 상부(3층) 내력력의 부재력

그림 13은 강막모델을 기준으로 한 각 모델별 내력력의 모멘트 백분율로서 축력과 모멘트에 의해 최대 철근량이

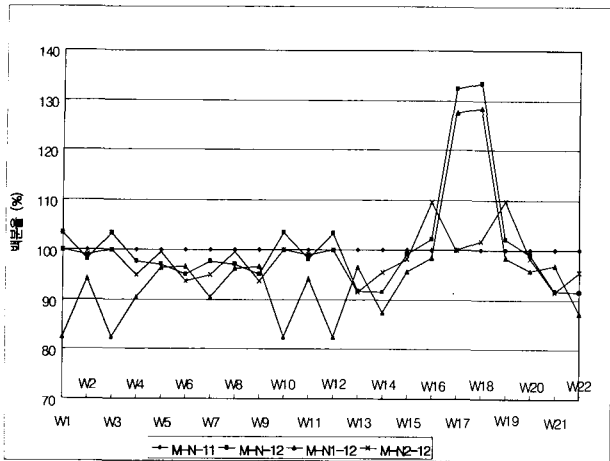


그림 13 각 모델별 내력벽의 모멘트 백분율

산출된 하중조합에 대한 모멘트로 계산된 것이다. 각 내력벽에서 최대 철근량이 산출된 하중조합은 대체적으로 일치하였으나 M-N-12 모델의 경우 W13, W14, W21, W22에서 강막모델과 다르게 나타났으며 M-N1-12의 경우는 W6, W9, W13, W14, W20, W21, W22에서 차이가 발생하였다. 또한 M-N2-12의 경우는 W13, W14, W20, W21, W22이 강막모델과 다른 하중조합에서 최대 철근량이 산출되었다.

각 모델별 오차율을 보면 M-N-12의 경우 W17, W18을 제외하면 최대 8.4%로 강막모델과 차이가 크지 않으나 M-N1-12의 경우는 최대 17.6%로 오차가 확대되었다. 또한 M-N1-12 모델의 모멘트 크기는 W17, W18을 제외하면 강막모델보다 작았다.

그림 14는 각 모델별 내력벽의 전단력 백분율로서 대부분의 벽체가 모멘트보다 오차율이 크게 나타났다. M-N-12 모델은 최대 24.2%의 오차율이 발생하였으며 M-N1-12 모델은 최대 37.4%의 오차율이 발생하였다.

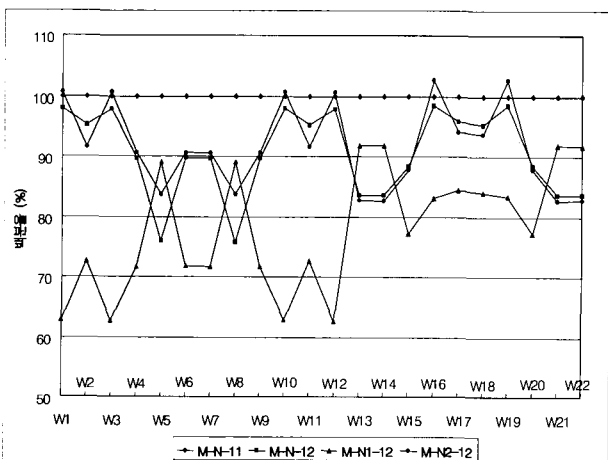


그림 14 각 모델별 내력벽의 전단력 백분율

4.2 MODEL II (정형, 비대칭)

4.2.1 건물 개요

모델 개요는 그림 15에서 보는 바와 같이 MODEL I (정형, 대칭)과 동일하나 내력벽 위치에 변화를 주어 하중이 비대칭적으로 작용하도록 하였다.

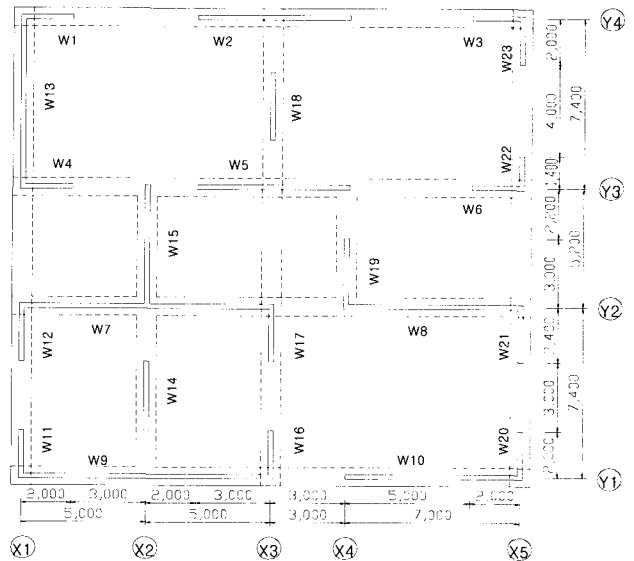


그림 15 MODEL II (정형, 비대칭) 전이층 구조평면도

4.2.2 해석 결과

1) 변위

그림 16은 중력 및 횡력이 작용할 때 강막모델과 전이층을 정밀한 격자로 분할한 모델간 변위 오차율로서, 중력작용 시 Y방향의 변위를 제외하면 대칭과 비대칭모델간 오차율 변화는 최대 3.37%로 크지 않음을 알 수 있다.

그림 17은 중력 및 횡력이 작용할 때 강막모델과 전이층과 전이층 상부층을 정밀한 격자로 분할한 모델간 변위 오차율로서 중력작용 시 Y방향의 변위를 제외하면 중력작용 시 대칭과 비대칭모델간 오차율 변화는 최대 1.16%로 크지 않으나 횡력 작용 시에는 최대 4.47%로 다소 증가하는 것을 알 수 있다.

2) 전이부 부재력

그림 18은 중력 및 횡력이 작용할 때 강막모델과 전이층을 정밀한 격자로 분할한 모델간 부재력 오차율로 비대칭 모델의 경우 중력작용 시 판요소모델이 강막모델보다 모멘트 및 전단력이 커져서 부의 오차율을 나타내고 있다. 또한 비대칭모델의 오차율이 중력 및 횡력 모두에서 대칭모델보다 증가하였으며 중력작용 시 모멘트에서 절대치로 3.9%의 최대 오차율 변화를 나타내었다.

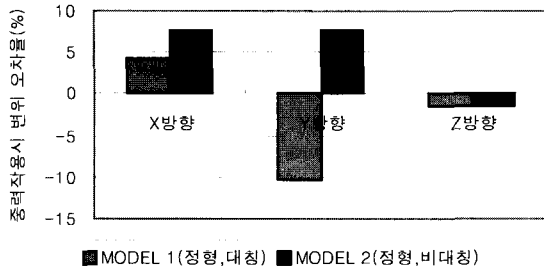


그림 16 강막모델과 판요소모델(1개층)의 변위오차율

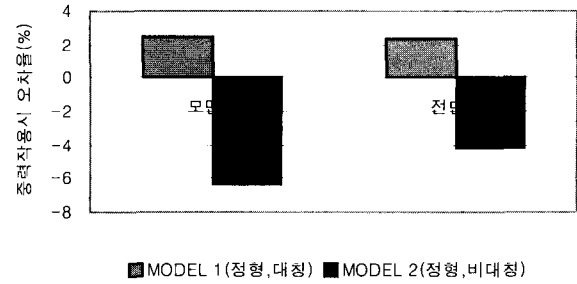


그림 18 강막모델과 판요소모델(1개층)간의 부재력 오차율

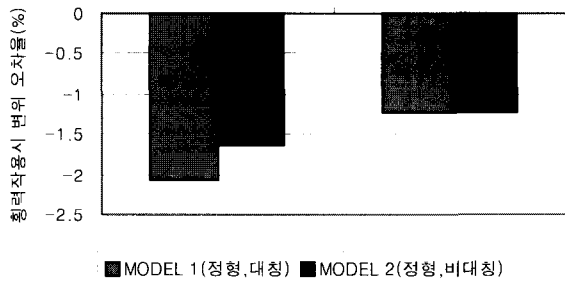


그림 17 강막모델과 판요소모델(2개층)의 변위오차율

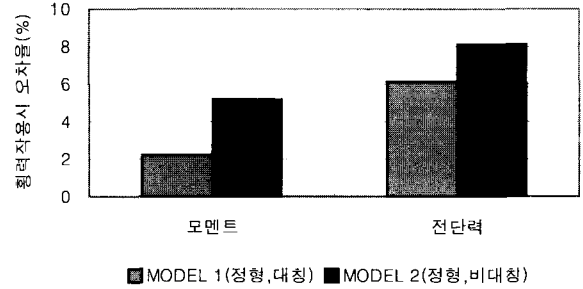


그림 19 각 모델별 내력벽의 모멘트 백분율

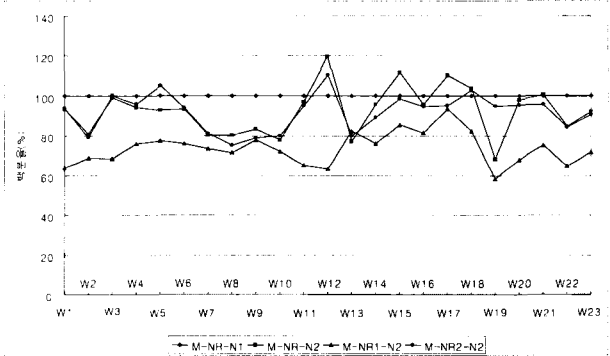
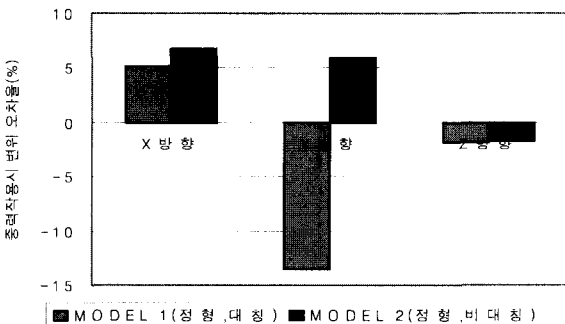


그림 20 각 모델별 내력벽의 전단력 백분율

3) 전이층 상부(3층) 내력벽의 부재력

그림 19는 비대칭모델의 내력벽 모멘트 백분율로서 축력과 모멘트에 의해 최대 철근량이 산출된 하중조합에 대한 모멘트로 계산된 것이다. W21, W22에서 큰 오차율을 보이나 전자의 경우 최대 철근량이 산출된 하중조합이 달라서 발생한 것이며 후자는 절대값 자체가 작기 때문에 큰 의미는 없다.

그림 20은 비대칭모델의 각 모델별 내력벽의 전단력 백분율로 대부분 벽체의 전단력이 대칭모델과 마찬가지로 모멘트보다 오차율이 커졌다. 그림 21은 전이층 및 전이층 상부층을 판요소로 입력한 대칭 및 비대칭모델의 내력벽

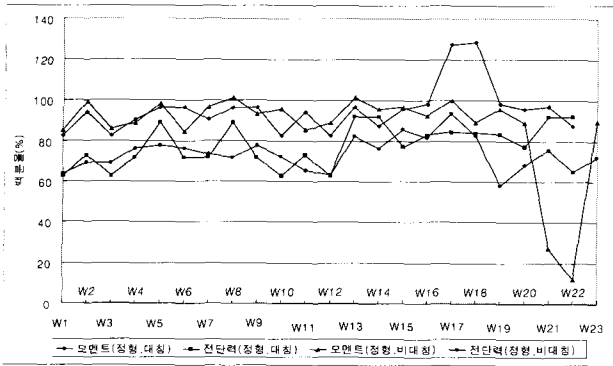


그림 21 M-N1-12(대칭)과 M-NR1-N2(비대칭)모델의 모멘트/전단력 백분율

모멘트와 전단력 백분율로서 대칭과 비대칭모델의 오차율 변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.

4.3 MODEL III(비정형, 대칭)

4.3.1 건물 개요

모델 개요는 MODEL I(정형, 대칭)과 동일하나 평면 형태를 정사각형(20×20m)에서 직사각형(30×20m)으로 바꾸어 평면형태 변화에 따른 영향을 고찰하였다.

4.3.2 해석 결과

1) 변위

그림 22는 중력 및 횡력이 작용할 때 강막모델과 전이층과 전이층 상부층(2개층)을 정밀한 격자로 분할한 모델간

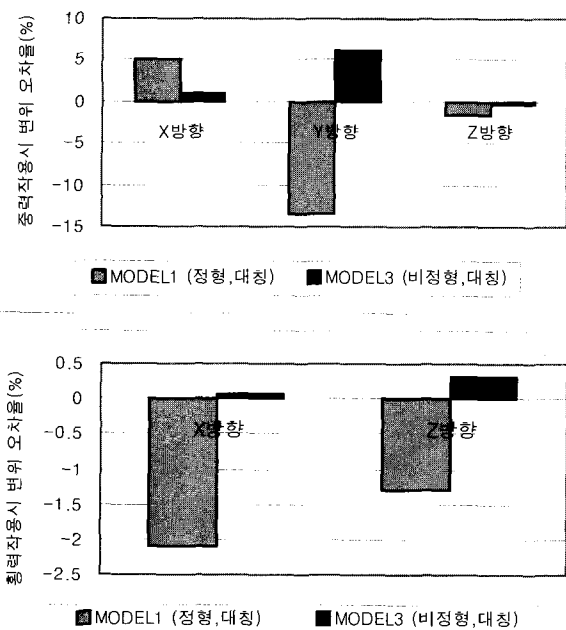


그림 22 변위 오차율

변위 오차율로서 두 모델간 오차율 변화는 중력작용 시 Y 방향에서 7.33%(절대치)로 최대치를 보였다. 비정형모델의 오차율이 정형모델보다 작아 강막모델과 판요소모델의 거동이 일치하는 경향을 보였다.

2) 전이부 부재력

그림 23은 중력 및 횡력이 작용할 때 강막모델과 전이층과 전이층 상부층을 정밀한 격자로 분할한 모델간 부재력 오차율로서 두 모델간 오차율 변화는 최대 3.67%로 평면 형태에 따른 변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.

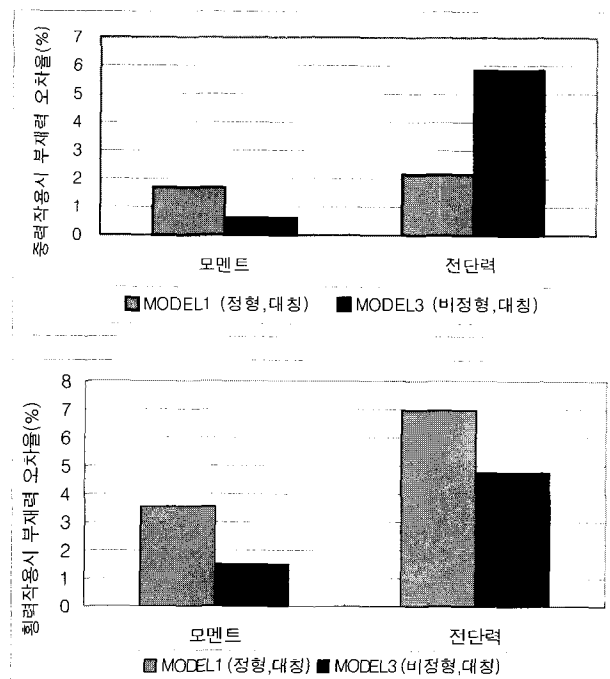


그림 23 전이부 부재력 오차율

3) 전이층 상부(3층) 내력벽의 부재력

그림 24를 보면 M-N1-12 모델의 경우 W18에서 최대 -28.33%의 오차율이 발생하였고 RM-A1-2 모델의 경우 강막모델과 판요소모델(2개층)간에 다른 하중조합에서 최대 철근량이 발생한 W4, W14, W19, W21, W22, W24, W26을 제외하면 W1과 W11에서 최대 20.66%의 오차율을 보이고 있다.

전단력은 그림 25와 같이 M-N1-12 모델의 경우 W3에서 최대 37.28%의 오차율이 발생하였고, RM-A1-2 모델은 W1, W4, W11, W14에서 최대 39.55%의 오차율이 발생하였다. 따라서 형태 변화에 따라 두 모델간 오차율에 미치는 영향은 거의 없었으나 비정형모델의 경우 많은 벽체에서 최대 철근량이 발생하는 하중조합번호가 다르고 오차 범위가 컸다.

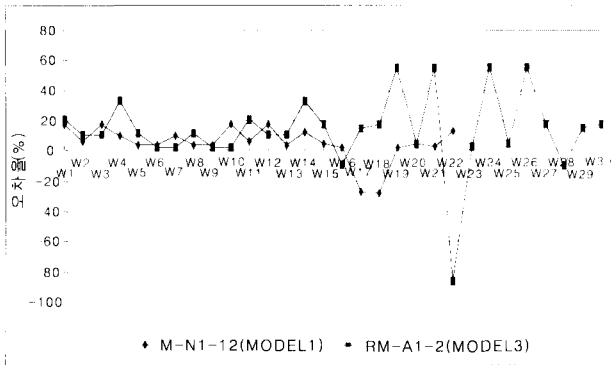


그림 24 MODEL I 과 MODEL III의 내력벽 모멘트 오차율

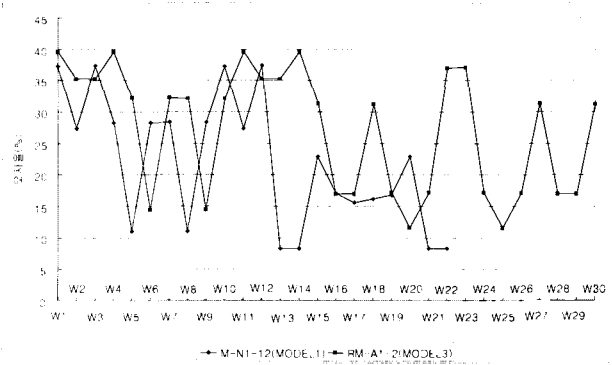


그림 25 MODEL I 과 MODEL III의 내력벽 전단력 오차율

4.4 MODEL IV(비정형, 비대칭)

4.4.1 건물 개요

모델 개요는 MODEL I(정형, 대칭)과 동일하나 평면 형태를 정사각형(20×20m)에서 직사각형(30×20m)으로 바꾸고 내력벽 위치에 변화를 주어 비대칭 하중에 의한 영향을 고찰하였다.

4.4.2 해석 결과

1) 변위

그림 26은 MODEL II와 MODEL IV간의 중력 및 횡력 작용시 변위 오차율로 비정형 비대칭 모델의 오차율이

작게 나타났다.

2) 전이부 부재력

그림 27은 MODEL III과 MODEL IV 및 MODEL II와 MODEL IV간의 중력 및 횡력 작용 시 부재력의 오차율로서 모델간 오차율 변화는 크지 않은 것을 알 수 있다.

3) 전이층 상부(3층) 내력벽의 부재력

그림 28은 MODEL II와 MODEL IV의 전이층과 전이층 상부층을 판요소로 입력한 모델간의 내력벽 모멘트 오차율이며 그림 29는 전단력의 오차율이다. 평면형태 변화에 따른 규칙적인 벽체 부재력의 변화는 발견할 수 없었으며 평면형태 변화에 따른 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

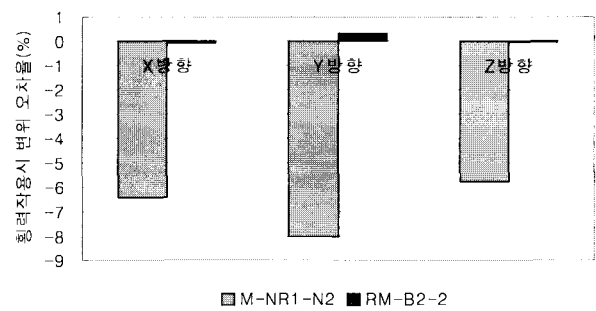
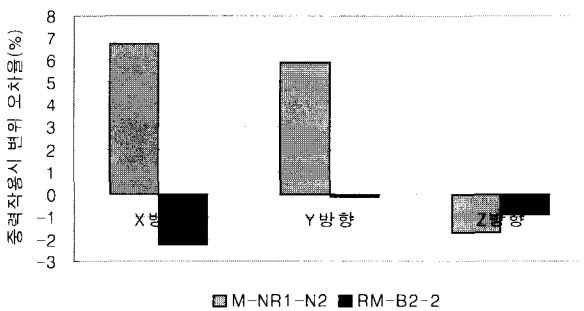


그림 26 변위오차율

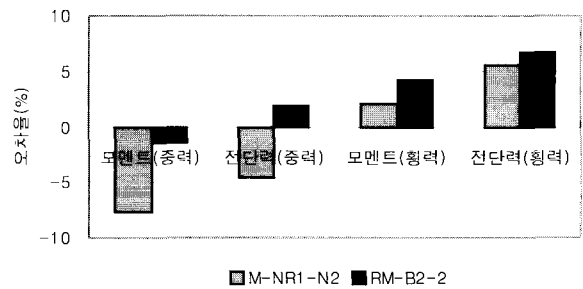
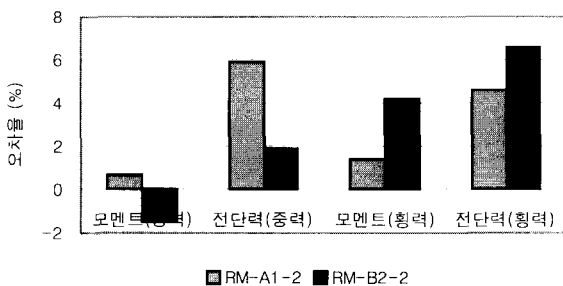


그림 27 전이부 부재력 오차율

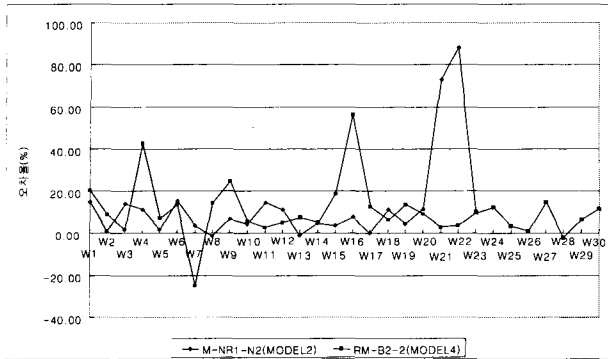


그림 28 MODEL II와 MODEL IV의 내력벽 모멘트 오차율

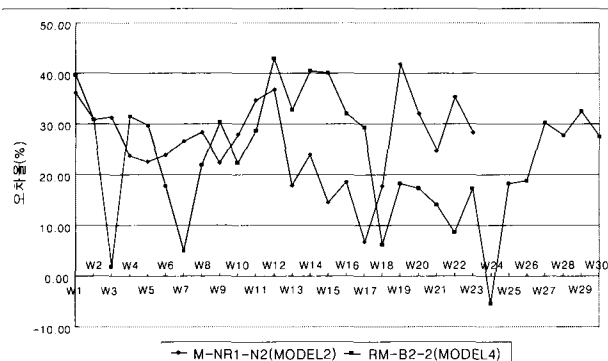


그림 29 MODEL II와 MODEL IV의 내력벽 전단력 오차율

5. 결과 분석 및 결론

5.1 결과 분석

5.1.1 변위

- 1) 힘의 작용방향인 중력작용시 Z방향 변위 오차율과 횡력(Rx)작용시 X방향 변위 오차율의 최대치는 정형-비대칭모델에서 6.45%였으며, 다른 방향의 변위 오차율은 이보다 큰 것도 있었으나, 변위 절대값 자체가 설계에 영향을 미치지 않을 정도로 작아서 큰 의미가 없으므로 각 모델별 변위는 거의 일치하는 것으로 판단할 수 있다.
- 2) 강막모델과 2개층 판요소모델 사이의 변위에 대한 오차율은 힘의 작용방향인 중력 작용 시 Z방향과 횡력 작용 시 X방향에서 각각 정형모델과 비정형모델 모두 하중이 비대칭적으로 작용할 때는 증가하였다.
- 3) 정형-대칭인 건물에 발생한 변위를 보면 중력 및 횡력 작용 시 강막모델과 성긴 판요소모델의 거동은 대체적으로 유사하여 두 모델간 오차율이 최대 0.6%로 거의 일치하나 정밀한 판요소 모델들과는 오차율이 최대 13.55%로 확대되었다.
- 4) 평면형태 변화에 따른 오차율의 변화는 크지 않았으

나 원형 및 삼각형 등 다양한 평면에 대한 검토가 필요하다.

5.1.2 전이보 부재력

- 1) 정형-대칭의 모델에서 강막모델과 전이층 바닥판을 성긴 격자(격자수: 100개)로 입력한 모델은 그 거동이 서로 유사함에도 불구하고 전이보 부재력은 크게 달라졌으나 정밀한 격자(격자수: 1600개)로 입력한 모델들과는 대체로 비슷한 값을 보였다. 이는 판요소의 격자수 또는 모양에 따라 부재력의 오차가 크게 확대될 수 있음을 보여주고 있다.
- 2) 전체 모델 중에서 일부를 제외하고 전단력의 오차율이 모멘트 오차율보다 증가하는 경향을 보였으며, 비대칭모델의 오차율이 대칭모델 오차율보다 증가하였다.
- 3) 형태 변화에 따른 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

5.1.3 전이층 상부 내력벽의 부재력

- 1) 전이층 상부 내력벽의 부재력은 전체 모델에서 전이보의 부재력에 비해 오차율의 변화가 컸으며, 정형-대칭인 모델의 경우 2개 층을 판요소로 적용한 모델과 전단력에서 최대 37.4%의 오차율을 보였다.
- 2) 대칭모델과 비대칭모델 모두 전단력의 오차율이 모멘트의 오차율보다 크게 나타났다.

5.2 결론

강막작용이 적용된 해석모델과 전이층 바닥판을 판요소로 넣고 해석한 모델의 거동은 대동 소이하나 전이보의 부재력에서는 바닥판의 격자수에 따라 무시할 수 없는 오차가 발생하고 있다. 따라서 건물 해석 시 바닥판을 판요소로 입력할 때에는 보다 정밀한 격자와 모양이 요구된다. 또한 전이층 상부 내력벽은 2개 층 판요소 입력 시 상당한 부재력이 절감되므로 최적화 설계가 요구될 때에는 전이층과 전이층의 상부층을 판요소로 입력하여 해석하는 것을 검토할 필요가 있다. 특히 비정형 구조물은 강막모델과 판요소모델간의 뚜렷한 오차율 변화를 고찰할 수 없었으나, 거동이 복잡한 양상을 보이므로 해석 방법 선택에 있어 신중함이 요구된다.

주상복합건물의 설계 시 강막모델의 전이보에 대한 부재력 오차율은 7~8%로 강막모델로 해석이 가능하나 현재 컴퓨터의 발달로 강막작용을 적용한 해석 모델의 장점인 해석 시간의 단축은 큰 의미를 상실하고 있는 상태이다. 따라서 요소의 수가 많지 않다면 전이층과 전이층의 상부층을 판요소로 입력하는 것을 고려할 필요가 있다. 또한 전이층의 수가 많아 전이층에 작용하는 중력 및 횡력하중이 크거나

바닥판의 개구부가 많을 시 규준에서 요구하는 바닥판에 대한 응력 검토가 필요하므로 전이층 바닥판을 판요소로 입력하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김상연, "복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구", 한국건설기술연구원, 1999
2. 황현식, 이동근, "주상복합건물의 효율적인 지진해석", 한국지진공학회 논문집 제1권 제1호, 1997, pp.79~88
3. POSEC, MIDAS/GEN, *User's Manual Volume I*, 1998
4. International Code Council, Inc., *International Building Code 2000*, International Code Council, Inc., 2000
5. Technical Note on Brick Construction, BIA, (a monthly series)
6. 문성권, "3차원 비정형 Setback 구조물의 동적특성", 전국전산구조공학회 제11권, 제4호, 1998, pp.287~294