

횡강성 영향행렬을 이용한 고층건물의 횡변위 제어 및 단면 재산정 방안

Lateral Drift Control and Resizing Technique for Tall Buildings using Lateral-Stiffness Influence Matrix

이 한 주*

김 치 경*

김 호 수**

Lee, Han-Joo

Kim, Chee-Kyeong

Kim, Ho-Soo

(논문접수일 : 2001년 7월 10일 ; 심사종료일 : 2002년 3월 26일)

요 지

본 연구에서는 횡강성 영향행렬을 이용한 최적설계의 효율성을 높이기 위해 각 층에서 층별 영향행렬을 구하는 계산모듈을 개발하고 가상하중법에 의한 민감도 해석을 수행한다. 아울러 최적설계결과를 실무에 직접 적용할 수 있도록 층별 횡강성 증대계수에 근거하여 횡하중 저항시스템의 부재단면크기를 재산정하는 방안을 강구한다. 이를 위해 단면 재산정 방안은 연속형과 이산형 단면설계법으로 나누어 고려되며, 단면특성과 단면치수와의 관계가 설정된다. 특히 강도구속조건에 대한 초기설계가 먼저 수행된 후 횡변위 구속조건을 초과하는 횡변위를 제어하는데 있어서 횡하중 저항 시스템만이 저항하도록 설계한다. 본 연구에서 제안된 고층건물의 횡변위 제어 및 단면 재산정 방안을 검토하기 위해 두 가지 형태의 45층 삼차원 구조물이 고려된다.

핵심용어 : 횡하중 저항시스템, 횡변위 제어, 횡강성 영향 행렬, 민감도 해석, 단면 재산정 기법

Abstract

This study develops the module to find the lateral stiffness influence matrix of each story and performs the displacement sensitivity analysis by virtual load method for the efficiency of optimal design using lateral stiffness influence matrix. Also, resizing technique based on the estimated lateral stiffness increment factors is developed to apply directly the results of optimal design. To this end, resizing technique is divided into the continuous and discrete section design methods. And then the relationships between section properties and section size are established. Specifically, an initial design under strength constraints is first performed, and then the lateral load resistant system is designed to control lateral displacements yet exceeding the drift criteria. Two types of 45-story three dimensional structures are presented to illustrate the features of the lateral drift control and resizing technique for tall buildings proposed in this study.

Keywords : lateral load resistant system, lateral drift control, lateral stiffness influence matrix, sensitivity analysis, resizing technique

† 책임저자, 정회원 · 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원
전화: 043-229-8483; Fax: 043-229-8483
E-mail: lhanjoo@hanmir.com

* 정회원 · 선문대학교 건설공학부 조교수

** 정회원 · 청주대학교 건축공학부 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에
보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

건축 구조물이 고층화됨에 따라 일반적으로 중력방향하중보다 풍하중, 지진하중과 같은 횡하중이 설계에 더 큰 영향을 미치므로 횡력에 대한 저항성능의 확보를 위한 횡하중 저항시스템의 적용방안과 그에 따른 구조물의 횡변위(최상층의 횡변위, 층간 횡변위) 제어문제는 구조물의 사용성 뿐만 아니라, P- δ 효과 등에 의한 이차적 응력의 유발로 인한 구조물의 안전성에도 큰 영향을 주는 중요한 요소이다.

그러나 많은 구조설계 프로그램들은 설계규준에 따른 강도구속조건은 만족하고 있는 반면, 횡변위 구속조건을 만족시키는 것과 같은 어려운 문제에 대해선 큰 노력을 기울이지 않고 있으며, 설계자의 직관이나 경험에 근거한 시행착오적인 방법에 의존하고 있다. 하지만 건축구조물의 거동특성이 대단히 복잡하여 구조변경에 따른 거동변화를 예측하는 일이 쉽지 않기 때문에 이러한 정성적 방법에 의한 횡변위 제어는 경우에 따라 여러 번의 반복해석에도 불구하고 최적의 선택을 놓치는 경우가 많다. 특히, 고층건물의 최적화를 위한 설계법은 일반적으로 전체 구조물의 모든 자유도를 고려하고 있으며 횡변위 구속조건을 만족시키기 위해 모든 부재의 단면크기를 재조정하고 있다. 그러나 고층구조물은 수많은 자유도와 부재로 이루어지기 때문에 이런 방법으로 최적설계를 수행하는 것은 많은 계산량과 계산시간을 요구하게 된다.

이에 대해 참고문헌 [2]에서는 바닥판의 횡격막작용 특성을 고려하여 각 층별 자유도를 3개로 감소시킨 횡강성 영향행렬을 사용한 민감도 해석을 이용하여 최적설계를 수행함으로써 이러한 문제점을 해결하고자 하였다. 그러나 횡강성 영향행렬 산정시 전체 층에 대한 자유도를 포함한 변환행렬의 역행렬을 사용함으로써 층단위 최적설계의 장점을 충분히 살리지 못 할뿐만 아니라 계산시간 및 메모리 문제로 적용상 문제점이 발생되었다. 또한 민감도 계수 산정시에도 전체 강성행렬의 역행렬을 직접 구함으로써 계산효율이 떨어지는 단점을 갖고있다. 따라서 본 연구에서는 각 층에서 층별 영향행렬을 구하도록 층단위의 계산모듈을 개발함으로써 계산시간 및 메모리에 대해 많은 절감효과가 있도록 하였으며, 전체 강성행렬의 역행렬을 구하지 않고 민감도 계수를 산정하도록 가상하중법에 의한 민감도 해석을 수행하였다.

또한, 최적설계 수행결과 구해지는 층별 횡강성 증대계수에 따라 평면 내 각 부재의 강성을 적절히 조절하는 것은 그 동안 설계자의 직관이나 경험에 의존하여 왔으나 본 연구에서는 최적설계결과를 실무에서 직접 적용할 수 있도록 층별 횡강성 증대계수에 근거하여 횡하중 저항시스템의 부재단면크기를 자동으로 재산정하는 방안을 강구한다. 이를 위해 단면 재산정 방안은 연속형 단면설계와 이산형 단면설계로 나누어 고려되며, 단면특성과 단면치수와의 관계를 설정한다. 특히 Chan과 Grierson¹⁾은 단면성질의 역수에 대한 단면특성관계식을 이용하였지만, 본 연구에서는 개개의 단면을 상관계수로 직접 연관시켜 환산오차를 줄일 수 있는 선형관계식을 이용한다.

아울러 강도구속조건에 대한 초기설계가 먼저 수행된 후 횡변위 구속조건을 초과하는 횡변위를 제어하는데 있어서 횡하중 저항시스템만이 저항하도록 설계한다. 이와 같이 본 연구에서 제시된 횡강성 영향행렬을 이용한 고층건물의 횡변위 제어 및 단면 재산정 방안을 검토하기 위한 적용예제로 전단벽 구조 또는 가새구조와 같은 횡하중 저항시스템을 가지는 삼차원 철골조 구조물이 고려된다.

2. 민감도 해석에 의한 횡변위 제어

건물이 고층화될수록 바닥판의 변형이 구조물 전체 작동에 미치는 영향은 줄어들게 되므로 바닥판이 무한히 큰 면내강성을 가지는 것으로 가정하여 각 층당 3개의 자유도(두개의 수평방향 변위자유도와 하나의 회전자유도)를 갖는 응축모델을 고려함으로써 층단위의 민감도해석 개념이 적용될 수 있다.

2.1 횡강성 영향행렬의 구성

횡하중 저항요소가 층당 3개의 자유도만으로 응축된 강성행렬을 횡강성행렬이라고 하며, 각 층의 횡저항시스템이 횡강성행렬에 기여하는 행렬을 횡강성 영향행렬이라고 정의한다.²⁾ 따라서 고층건물의 횡하중 저항시스템의 강성변화가 전체 구조물의 횡강성에 미치는 영향을 횡강성 영향행렬로 나타낼 수 있다.

이러한 횡강성 영향행렬을 구하기 위하여 강성행렬 K 를 다음과 같이 층별 강성행렬로 나누어 표현한다.

$$K = K_{L1} + K_{L2} + \dots + K_{Ln} + K_o$$

$$= x_1 \frac{\partial K}{\partial x_1} + x_2 \frac{\partial K}{\partial x_2} + \dots + x_n \frac{\partial K}{\partial x_n} + K_o \quad (1)$$

여기서 n 은 층수, x_i 는 설계변수로서 각 층 i 에 대응하는 횡강성 증대 계수이며, K_{Li} 는 i 층 횡저항 구조 요소에 의한 강성행렬, K_o 는 전 층에 걸쳐 횡저항 구조 요소를 제외한 기타의 구조요소들에 의해 구성된 강성행렬이다. 이때 K_{Li} 는 i 층 자유도와 관련된 부분에만 0이 아닌 계수를 갖고 그 외의 계수는 모두 0인 부분행렬이다. 식(1)에 LDL^T 분해법을 적용하면 식(2)와 같이 변환될 수 있다.

$$\bar{K} = L^{-1}KL^{-T}$$

$$= L^{-1}K_{L1}L^{-T} + L^{-1}K_{L2}L^{-T} + \dots + L^{-1}K_{Ln}L^{-T} + L^{-1}K_oL^{-T}$$

$$= x_1L^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_1} L^{-T} + x_2L^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_2} L^{-T} + \dots + x_nL^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_n} L^{-T} + L^{-1}K_oL^{-T}$$

$$= x_1\bar{K}_1 + x_2\bar{K}_2 + \dots + x_n\bar{K}_n + \bar{K}_o \quad (2)$$

여기서 L 은 층당 3개의 자유도만을 유지하고 나머지 자유도들을 소거하는 정적응축을 위한 변환행렬을 나타내며, \bar{K}_i 는 i 층 강성행렬이 변환행렬 L 에 의하여 변환된 결과로 i 층의 횡강성 영향행렬이다. \bar{K}_i 는 K_{Li} 와 달리 모든 요소가 값을 갖는 전체행렬이며 방정식의 수는 (층수×3)의 차수를 갖는다.

2.2 횡강성행렬에 대한 민감도해석

응축된 횡강성행렬을 이용한 평형방정식은 식(3)과 같다.

$$\bar{K}\bar{u} = \bar{p} \quad (3)$$

여기서 \bar{u} , \bar{p} 는 각각 응축된 자유도에 대응하는 변위벡터와 하중벡터를 나타낸다.

본 연구에서 최적화문제는 구조물의 중량을 최소화하는 대신 횡하중 저항시스템의 층별 횡강성을 최소화하는 것을 포함한다. 이를 위해 각 층 i 에 해당하는 횡강성 증대계수 x_i 를 설계변수로 선정한다. 또한 설계

변수 x_i 의 미소변동에 따른 변위민감도 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i}$ 를 구하기 위해 식(3)을 설계변수에 대하여 편미분하면 식(4)와 같이 되고, 이를 다시 정리하면 식(5)와 같다.

$$\bar{K} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{K}}{\partial x_i} \bar{u} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} = -\bar{K}^{-1} \frac{\partial \bar{K}}{\partial x_i} \bar{u} \quad (5)$$

여기서, 하중 \bar{p} 는 설계변수의 변화와 무관한 것으로 가정하므로 $\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = 0$ 이 된다. 식(5)에서 $\partial \bar{K} / \partial x_i$ 는 식(2)로부터 식(6)과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (x_1 \bar{K}_1 + \dots + x_i \bar{K}_i + \dots + x_n \bar{K}_n + \bar{K}_o)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} (x_i \bar{K}_i) = \bar{K}_i \quad (6)$$

따라서, 식(5)는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} = -\bar{K}^{-1} \bar{K}_i \bar{u} \quad (7)$$

j절점의 변위 δ_j 는 식(8)과 같이 구조물의 전체 변위벡터 \bar{u} 와 연관된다.

$$\delta_j = \bar{b}_j^T \bar{u} \quad (8)$$

여기서 \bar{b}_j 는 설계와 관련된 변위를 나타내기 위한 벡터이다. 즉, $\bar{b}_j = [1, -1, 0, \dots, 0]$ 라면 $\delta_j = u_1 - u_2$ 이다.

설계변수 x_i 에 대한 j절점 변위 δ_j 의 변위민감도를 구하기 위해 식(8)을 설계변수 x_i 에 대해 편미분하면 식(9)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \delta_j}{\partial x_i} = \bar{b}_j^T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} + \bar{u}^T \frac{\partial \bar{b}_j}{\partial x_i} = \bar{b}_j^T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} \quad (9)$$

여기서 벡터 \bar{b}_j 는 매개변수 x_i 의 변화와 무관하므로 $\frac{\partial \bar{b}_j}{\partial x_i} = 0$ 이 된다. 식(9)에 식(7)을 대입하여 정리하면 식(10)과 같이 된다.

$$\frac{\partial \delta_j}{\partial x_i} = -\overline{b_j^T} \overline{K}^{-1} \overline{K_i} \overline{u} \quad (10)$$

또한, 식(8)에 단위가상하중이 곱해진다고 가정하면 식(11)과 같이 된다. 이 식은 가상일 등가의 조건을 정의하고 있으며 \overline{u} 는 실제 변위이기 때문에 $\overline{b_j}$ 를 가상하중의 벡터로 고려할 수 있다.

$$1 \cdot \delta_j = \overline{b_j^T} \cdot \overline{u} \quad (11)$$

$\overline{b_j}$ 를 가상의 하중벡터로써 적용하면 가상변위벡터 \overline{u} 에 해당하는 벡터는 식(12)와 같이 된다.

$$\overline{u_j} = \overline{K}^{-1} \overline{b_j} \quad (12)$$

식(12)를 식(10)에 대입하여 정리하면 식(13)과 같은 변위민감도가 구해진다.

$$\frac{\partial \delta_j}{\partial x_i} = -\overline{u_j^T} \overline{K_i} \overline{u} \quad (13)$$

2.3 최적설계 정식화

강성구속조건에 따른 최적화 문제는 식(14)와 같은 횡변위구속조건을 포함하게 된다.

$$\delta_i(x) = u_i(x) - u_{i-1}(x) \leq d_i h_i \quad (14a)$$

$$(i = 1, \dots, n)$$

$$\delta_i(x) = u_i(x) \leq d_i h_i \quad (14b)$$

여기서, $\delta_i(x)$, $\delta_i(x)$ 는 각각 i 층에서의 층간횡변위 및 최상층 횡변위를 나타내고, $u_i(x)$, $u_{i-1}(x)$ 는 i 층 및 $i-1$ 층에서의 횡변위, $u_i(x)$ 는 최상층 횡변위, d_i 는 i 층의 허용 층간횡변위비, d_i 는 최상층 허용 횡변위비, h_i 는 i 층의 층높이, h_i 는 건물 전체높이를 나타낸다.

초기에 강도구속조건에 근거한 부재설계를 수행한 후 횡변위가 허용횡변위를 초과할 경우 초과하는 횡변위 $d\overline{u}$ 를 제어하는데 횡하중 저항시스템만이 부담하는 것으로 가정한다. 이와 같은 개념하에서 부등제약조건 식(14)는 식(15)와 같은 등제약조건식으로 대체될 수 있다.

$$d\overline{u} = u_{limit} - u_s = 0 \quad (15)$$

여기서, u_{limit} 는 규정된 횡변위 제한값(drift criteria)을 의미하고, u_s 는 초기의 강도구속조건에 근거한 설계에 의해 구해진 횡변위값을 나타낸다. 횡하중 저항시스템이 제어해야하는 횡변위 차이값인 $d\overline{u}$ 는 식(16)과 같이 설계변수 x_i 에 대한 변분함수로써 표현될 수 있다.

$$d\overline{u}_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} dx_j \quad (i = 1, \dots, n) \quad (16)$$

최적설계의 목적은 횡변위 구속조건식인 식(16)을 만족하기 위해 요구되는 층별 횡강성의 증분을 최소화하는 것이다. 이에 따라 설계변수인 층별 횡강성 증대계수 x_i 에 의해 식(17)과 같은 목적함수가 구성될 수 있다.

$$S(x_i) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (17)$$

설계최적화문제는 식(16)과 식(17)로부터 라그랑지 함수(Lagrangian function)의 최소화로서 정식화된다.

$$L(x_i, \lambda_i) = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left(d\overline{u}_i - \sum_{j=1}^n \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} dx_j \right)$$

$$x_i \geq 0; \lambda_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (18)$$

여기서, λ_i 는 i 층과 관련된 라그랑지 변수를 나타낸다. 최적설계과정은 구조물의 횡변위가 횡변위 제한값에 수렴할 때까지 식(18)을 최소화하는 반복과정과 각 층의 횡강성행렬 \overline{K}_k 를 식(19)와 같이 재구성하는 것을 포함한다.

$$\overline{K}^{(\nu+1)} = \overline{K}^{(\nu)} + \sum_{k=1}^n x_k \overline{K}_k \quad (19)$$

3. 부재 단면 재산정 기법

최적설계를 통해 구해진 층별 횡강성 증대계수를 실무에 직접 적용하기 위해서는 본 알고리즘에 대한 이해

및 구조물의 횡강성에 대한 예비지식 등이 요구되므로 적용상 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 제한된 횡변위 제어 알고리즘을 손쉽게 실무에 적용할 수 있도록 층별 횡강성 증대계수에 따른 부재 단면 재산정 기법을 제시하고자 한다.

3.1 단면 특성 관계식의 적용

부재 단면 재산정 과정은 횡하중 저항시스템의 거동 특성을 고려하여 초기 부재의 단면특성(단면적, 단면 이차모멘트 등)을 층별 횡강성 증대계수만큼 증대시키고, 증대된 단면특성치를 만족하도록 설계의도에 따라 연속형 단면설계 또는 이산형 단면설계를 수행하는 것으로 이루어 진다.

횡하중 저항시스템이 가새골조, 아웃리거 트러스, 벨트 트러스 등과 같이 트러스 요소와 보요소로 구성된 경우 이차원 구조물로 가정하면 강성행렬은 식(20)과 같이 축강성과 휨강성이 조합된 것으로 표현될 수 있다. 여기서 K_i^A 와 K_i^I 는 각각 부재 i 의 축강성과 휨강성에 관련된 상수행렬이고 m 은 전체 부재수를 나타낸다.

$$K = \sum_{i=1}^m (K_i^A a_i + K_i^I I_i) \quad (20)$$

또한, 적당한 단면특성 관계식을 설정하면 전체 설계 변수의 수를 줄여줄 수 있으므로 본 연구에서는 식(21)과 같은 단면특성 관계식을 이용하여 각 부재의 단면적과 단면 이차모멘트를 연관시킨다.

$$I = ka \quad (21)$$

표준단면을 이용한 이산형 단면설계의 경우에는 각각의 이산형 단면에 대한 단면 이차모멘트를 단면적으로 나눔으로서 상관계수 k 를 구할 수 있고, 연속형 단면설계의 경우에는 초기에 주어진 단면형상이 일정하다는 가정을 이용한 표 1의 단면특성과 단면치수와의 관계를 통해 구할 수 있다.

단면특성 관계식인 식(21)을 식(20)에 대입하면 강성행렬은 식(22)와 같이 단면적 a 에 대해 선형화된 형태로 표현된다.

$$K = \sum_{i=1}^m (K_i^A a_i + K_i^I k_i a_i) = \sum_{i=1}^m K_i^* a_i \quad (22)$$

표 1 단면특성과 단면치수와의 관계

단면 형상		
단면적	$a = c \times b^2$	$a = \{2c_2c_3 + (c_1 - 2c_3)\} t^2$
단면이차 모멘트에 의한 단면적	$k = \frac{(cb)^2}{12}$	$k = \frac{(c_1 - 2c_3)^3 + 2c_2c_3 + 6c_2c_3(c_1 - c_3)^2}{12(c_1 + 2c_2c_3 - 2c_3)}$
부재단면 치수	$b = \sqrt{\frac{a}{c}}$ $h = cb$	$t = \sqrt{\frac{a}{2c_2c_3 + c_1 - 2c_3}}$ $B = c_2t, H = c_1t$ $t_1 = t, t_2 = c_3t$

여기서 $K_i^* = K_i^A + K_i^I k_i$ 인 상수행렬이다. 따라서 횡하중 저항시스템이 트러스 요소와 보요소로 구성된 경우는 식(22)를 적용하여 각 부재의 단면적을 층별 횡강성 증대계수만큼 증대시키면 된다.

3.2 부재별 강성기여도 적용

부재단면은 횡하중 저항시스템을 이루는 구성요소(기둥, 보, 가새 등)에 상관없이 일률적으로 층별 횡강성 증대계수에 따라 단면적을 증대시키거나 구성요소의 강성기여도를 고려하여 재분배된 층별 횡강성 증대계수에 따라 부재단면을 재산정할 수 있다.

본 연구에서는 횡하중 저항시스템을 이루는 부재별 강성기여도를 구하기 위해 식(23)과 같은 부재단위의 민감도 해석을 수행하고 현 단계의 변위를 제어 변위로 제어하면서 증가되는 강성이 최소가 되도록 하는 식(24)를 이용한다.³⁾

$$C_{ii} = \frac{\partial u_i}{\partial a_i} = -\frac{1}{a_i} (u_i^T K_i u_i) \quad (23)$$

$$\Delta a_i = \frac{C_{ii}}{\omega_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{ii}^2}{\omega_i}} \cdot \Delta u_i \quad (24)$$

여기서 u 는 전체 변위, u_i 는 최상층 변위, a_i 는 부재 i 의 단면적, K_i 는 부재 i 의 강성행렬, ω_i 는 부재 i

의 중량계수이다. Δu_i 는 현재 단계의 최상층 변위와 제어하려는 변위의 차를 의미하고, Δa_i 는 변위구속조건을 만족시키기 위한 부재 i 의 단면적 변화량을 의미한다. 또한 C_u 는 단면적의 미소변화가 최상층 변위에 미치는 영향을 의미한다.

특히 횡하중 저항시스템이 표 1과 같은 단면형상으로 구성되어 있을 경우 각 부재의 단면특성을 층별 횡강성 증대계수만큼 증대시킨 후 연속형 단면설계를 할 경우에는 표 1의 단면특성과 단면치수와의 관계를 이용하여 부재의 새로운 단면을 재산정하고, 이산형 단면설계를 할 경우에는 표준단면 데이터를 단면적에 대한 오름차순으로 정렬하고 각 부재의 요구되는 단면적보다 크면서 가장 가까운 표준단면을 선정하면 된다. 또한 횡하중 저항시스템이 전단벽구조인 경우 전단벽구조의 횡변위 거동은 일반적으로 층모멘트에 의한 휨변형이 지배적이므로 전단벽의 단면 이차모멘트를 증대시키면 된다.⁴⁾ 전단벽은 일반적으로 평면계획상 길이가 고정되어 있으므로 벽두께를 설계변수로 하여 층별 횡강성 증대계수만큼 증대시키면 된다.

4. 적용 및 검토

본 예제에서 고려된 대상구조물은 그림 1~3과 같은 두 가지 형태의 45층 건물로 각 구조물의 층고는 모두 3.5m이고, 전체 높이는 157.5m이다. 평면 내 중앙부의 코어가 본 예제 구조물의 횡하중 저항시스템이며, 기타 골조는 모두 중력하중 저항을 위한 구조요소로 간주된다. 모델 1은 그림 1과 같이 철골조와 전단벽구조, 모델 2는 그림 2와 같이 철골조와 X형 가새철골조가 각각 중력저항시스템과 횡하중 저항시스템으로 사용되었다. 횡변위 제어는 대상구조물의 Y방향 변위에 한정하여 수행하였으며, 최상층 횡변위가 전체 높이의 $H/400$ 이하가 되도록 하였다. 최적설계의 수립은 제어된 횡변위와 제어하려는 횡변위의 차이가 0.5%이내일 때 만족되는 것으로 가정하였다. 또한 해석모델에 적용되는 풍하중은 규준에 따라 산정하였으며 표 2와 같다.

표 3은 강도구속조건에 근거하여 구한 대상구조물의 초기 부재단면을 중력 저항시스템과 횡력 저항시스템별로 나누어서 나타낸 것이다. 모델 1과 2의 철골단면은 미국의 AISC 표준 Wide-Flange W 철골단면을

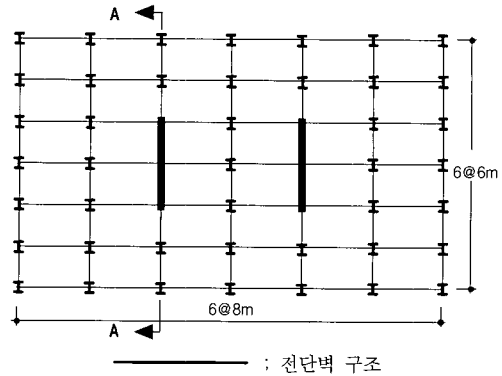


그림 1 모델 1 : 철골조 + 전단벽구조

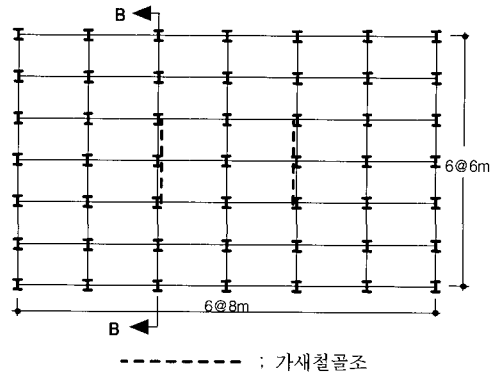


그림 2 모델 2 : 철골조 + X형 가새철골조

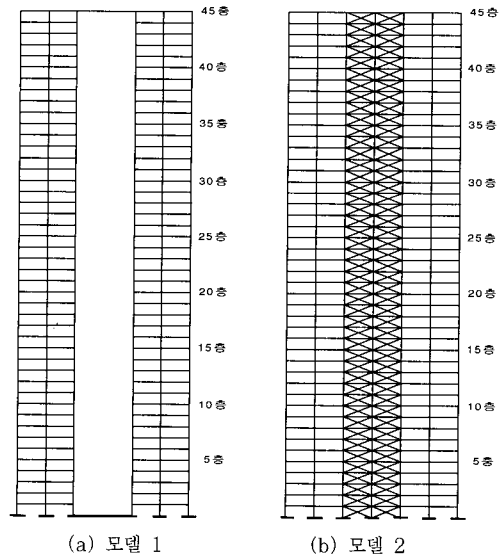


그림 3 모델의 단면도

표 2 대상구조물에 적용된 풍하중

층	풍하중 (ton)	층	풍하중 (ton)	층	풍하중 (ton)	층	풍하중 (ton)
1	13.33	13	27.79	25	37.17	37	44.24
2	12.10	14	28.72	26	37.82	38	44.77
3	14.48	15	29.62	27	38.46	39	45.29
4	16.46	16	30.48	28	39.09	40	45.80
5	18.18	17	31.31	29	39.70	41	46.31
6	19.71	18	32.12	30	40.30	42	46.80
7	21.11	19	32.90	31	40.89	43	47.30
8	22.40	20	33.66	32	41.48	44	47.78
9	23.60	21	34.39	33	42.05	45	24.13
10	24.73	22	35.11	34	42.61		
11	25.80	23	35.81	35	43.16		
12	26.82	24	36.50	36	43.70		

표 3(a) 모델 1의 초기부재단면

층	중력저항시스템		횡력저항시스템
	보	기둥	벽체두께(mm)
41~45	W24×84	W14×145	200
36~40	W24×94	W14×193	200
31~35	W24×103	W14×211	200
26~30	W24×104	W14×257	200
21~25	W24×117	W14×342	200
16~20	W24×131	W14×370	200
11~15	W24×131	W14×455	200
6~10	W24×146	W14×550	200
1~5	W24×146	W14×550	200

표 3(b) 모델 2의 초기부재단면

층	중력저항시스템		횡력저항시스템		
	보	기둥	보	기둥	가새
41~45	W24×84	W14×145	W24×62	W14×22	W14×22
36~40	W24×94	W14×193	W24×84	W14×61	W14×22
31~35	W24×103	W14×211	W24×94	W14×90	W14×22
26~30	W24×104	W14×257	W24×103	W14×145	W14×22
21~25	W24×117	W14×342	W24×104	W14×193	W14×22
16~20	W24×131	W14×370	W24×117	W14×211	W14×22
11~15	W24×131	W14×455	W24×117	W14×257	W14×22
6~10	W24×146	W14×550	W24×131	W14×342	W14×22
1~5	W24×146	W14×550	W24×131	W14×370	W14×22

사용하였으며, 실용성을 고려하여 기둥과 가새는 정방형에 가까운 W14층에서 선정되도록 하였고 보는 쪽에 비해 층이 큰 W24층에서 선정되도록 하였다. 또한 횡변위 제어를 위해 재설계되는 가새골조 구성요소의 경우도 기둥과 가새는 W14를 그리고 보는 W24에서 선정되도록 하였다.

두 모델에 대해 강도구속조건에 근거한 초기설계를 먼저 수행하고, 초과된 횡변위를 제어하기 위해 본 알고리즘을 적용한다. 최적설계를 통해 구해진 층별 횡강성 증대계수에 따라 단면을 재설계시 중력 저항시스템은 초기단면을 그대로 유지하고 횡하중 저항시스템의 부재들만 재설계되도록 하였다. 또한 모델 1의 경우 전단벽의 길이는 그대로 두고 두께만을 재조절하였으며, 횡하중 저항시스템이 가새철골조인 모델 2의 경우는 부재단면을 표준 철골단면 데이터로부터 선정되도록 하였다. 각 모델의 모든 부재를 5개층 단위로 그룹화하여 수행하였으며, 모델 2는 각 부재별 강성기여도에 따른 영향을 알아보기 위해 강성기여도를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 수행하였다. 여기서 강성기여도값은 식(23), (24)를 이용하여 모델 2에 분담 횡하중을 가한 후 부재단위의 강성행렬에 대한 민감도해석을 수행하고 현재 변위를 제어 변위로 제어하면서 증가되는 강성이 최소가 되도록 하여 부재종류별로 강성기여도를 구하였다. 그 결과 구해진 강성기여도는 보, 기둥, 가새부재에 대해 각각 7.1%, 63.1%, 29.8%로 나타났다.

표 4~6은 각 모델에 대한 횡변위제어 수행결과 나온 층별 횡강성 증대계수와 그에 따라 산정된 소요단면 크기 및 설계단면크기를 나타낸 것이다. 또한 그림 4

표 4 모델 1의 최적설계결과

층	x_i	소요단면크기 (mm)	설계단면크기 (mm)
41~45	1.00	200	200
36~40	1.00	200	200
31~35	1.00	200	200
26~30	1.00	200	200
21~25	1.00	200	200
16~20	1.04	208	250
11~15	1.15	229	250
6~10	1.38	276	300
1~5	2.24	448	450

표 5 모델 2의 최적설계결과(부재별 강성기여도 고려 안함)

층	x_i	설계단면크기		
		보	기둥	가새
41~45	1.00	W24×68	W14×26	W14×26
36~40	1.00	W24×84	W14×61	W14×22
31~35	1.00	W24×94	W14×90	W14×22
26~30	1.01	W24×104	W14×159	W14×26
21~25	1.04	W24×117	W14×211	W14×26
16~20	1.10	W24×131	W14×233	W14×26
11~15	1.23	W24×146	W14×342	W14×30
6~10	1.41	W24×192	W14×500	W14×34
1~5	1.89	W24×250	W14×730	W14×43

표 6 모델 2의 최적설계결과(부재별 강성기여도 고려함)

층	x_i	부재별 x_i 의 재분배			설계단면크기		
		보 (7.1%)	기둥 (63.1%)	가새 (29.8%)	보	기둥	가새
41~45	1.00	1.00	1.04	1.02	W24×68	W14×26	W14×26
36~40	1.00	1.00	1.00	1.00	W24×84	W14×61	W14×22
31~35	1.00	1.00	1.00	1.00	W24×94	W14×90	W14×22
26~30	1.01	1.00	1.02	1.01	W24×104	W14×159	W14×26
21~25	1.04	1.01	1.07	1.03	W24×117	W14×211	W14×26
16~20	1.10	1.02	1.19	1.09	W24×131	W14×257	W14×26
11~15	1.23	1.05	1.43	1.21	W24×131	W14×370	W14×30
6~10	1.41	1.09	1.78	1.37	W24×146	W14×665	W14×34
1~5	1.89	1.19	2.68	1.79	W24×162	W14×730	W14×43

및 5는 모델 1과 2의 강성기여도 고려여부에 따른 횡하중 저항시스템의 층별 물량비(최종물량/초기물량)를 나타낸 것인데 모두 고층에서 저층으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보여준다. 모델 1과 2에 대한 초기 최상층 변위는 각각 42.08cm, 41.67cm였는데, 최적설계된 구조물을 재해석해 본 결과 두 모델 모두 제어하려는 변위값 39.38cm(H/400) 이하로 제어되었다. 특히 모델 2의 경우 강성기여도 여부에 따른 최적설계 결과를 살펴보면 강성기여도를 고려한 경우 최상층 변위가 39.05cm로 제어되었고, 강성기여도를 고려하지 않은 경우는 39.37cm로 제어되었다. 또한 횡저항 시스템의 초기중량은 52.4ton이었는데, 변위가 제어된 후의 최종중량은 강성기여도가 고려되지 않은 경우 69.7ton이었고 강성기여도가 고려된 경우는 70.5ton으로 강성기여도가 고려된 경우가 더 많이 증가되었지만 그 차이가 1.1%로 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

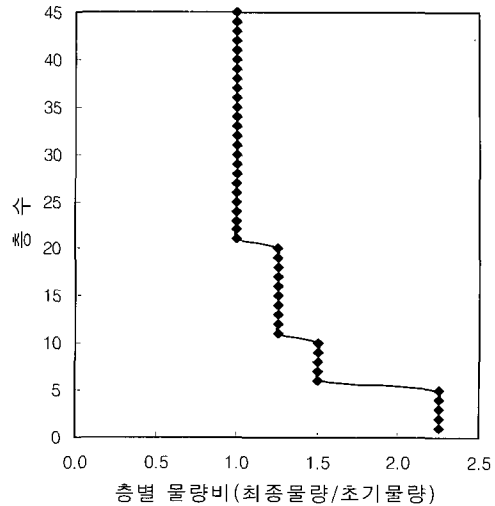


그림 4 모델 1의 층별 물량비

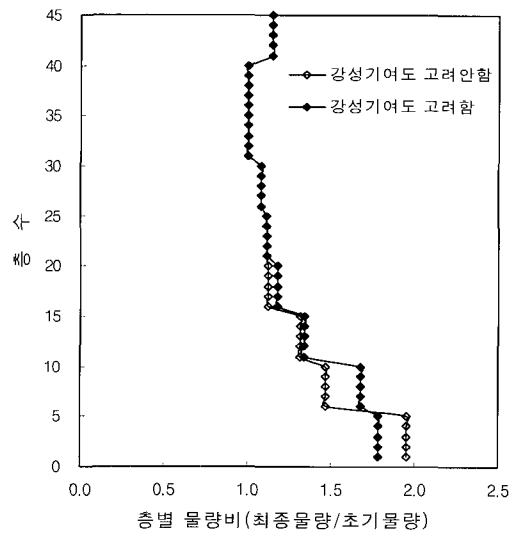


그림 5 모델 2의 층별 물량비

이와같이 강성기여도 고려여부에 따른 최종중량차이는 거의 없지만 강성기여도를 고려하지 않은 경우 최종 횡변위가 허용치와 거의 유사하지만 강성기여도를 고려한 경우는 변위제어가 허용치보다 더 크게 이루어짐을 알 수 있다. 이것은 횡하중 저항시스템을 이루는 구성요소의 강성을 층별 횡강성 증대계수에 따라 똑같이 증대시킨 것이 아니라, 구성요소의 횡변위제어에 미치는 영향을 강성기여도에 반영하였기 때문이다. 그러나 강성기여도를 고려할 경우 변위제어가 허용치보다 크게 됨으로써 원래 예측했던 허용치보다는 안전측이 되지

만 횡하중 저항시스템의 형태에 따라 강성기여도를 산정하는 것이 쉽지 않으므로 실용적인 측면에선 강성기여도를 고려하지 않고 횡하중 저항시스템의 거동특성을 고려하여 층별 횡강성 계수에 따른 단면특성을 조절함으로써 부재의 단면크기를 직접 산정하는 것이 일반적이다.

5. 결 론

본 연구는 횡변위 구속조건을 받는 고층건물에 대한 효율적인 최적설계 및 단면 재산정 방안을 개발하기 위해 수행되었으며, 이를 예제에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서는 횡강성 영향행렬을 이용한 최적설계의 효율성을 높이기 위해 각 층에서 층별 영향행렬을 구하는 계산모듈을 개발하고 가상하중법에 의한 민감도 해석을 수행함으로써 계산시간과 메모리에서 큰 절감효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 대상구조물을 횡하중 저항시스템과 중력 저항시스템으로 분리하여 감도해석을 수행하고 횡하중 저항시스템만을 재설계함으로써 횡변위제어를 위하여 중력 저항시스템이 변경되지 않도록 조절할 수 있으며 최적해에 대한 수렴속도와 전산기의 처리속도를 보다 향상시킬 수 있다.
- 3) 모델 2의 경우 횡하중 저항시스템을 이루는 각 구성요소가 횡변위 제어에 미치는 영향 정도를 강성기여도에 반영함으로써 강성기여도 고려여부에 따른 최종중량차이는 거의 없으면서 강성기여도를 고려하지 않은 경우보다 변위제어에 더 많은 효과가 있음을 알 수 있다.
- 4) 모델 1과 모델 2의 층별 물량비를 통해 횡하중에 대한 횡변위를 효율적으로 저항하기 위해선 더 낮은 층의 레벨에서의 횡강성 및 소요물량이 증가되어야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 횡하중에 의해 발생하는 변형에 대한 저항성능을 확보하기 위해선 구조물의 낮은 층의 횡강성을 증대시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.
- 5) 최적설계를 통해 구해진 층별 횡강성 증대계수에 따라 단면특성 관계식이나 부재별 강성기여도를 적용하여 부재단면을 재산정하는 기법이 강구됨으로써 최적설계 결과를 실무에 직접 적용할 수 있도록 해준다.
- 6) 본 연구 결과는 대상구조물의 횡변위 구속조건을 정량적으로 만족시킬 수 있도록 소요강성을 재평가하고 이를 통해 횡하중 저항시스템의 부재 재설계 방안을 제시함으로써 시행착오적인 구조해석 및 부재 재설계 반복과정을 배제시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 1999년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 99 건축-10) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. C. M. Chan and D. E. Grierson, "An Efficient Resizing Technique for the Design of Tall Steel Buildings Subject to Multiple Drift Constraints," *Int. J. of Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 2, 1993, pp.17~32
2. 김호수, 김치경, 황재승, 홍성목, "분할구조 감도해석을 이용한 고층건물의 횡변위제어에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제13권, 제4호, 1997, pp.371~380
3. 이한주, 김호수, "근사화 개념과 민감도 해석기법을 이용한 고층 철골조의 강성최적설계", 대한건축학회 논문집, 제17권, 제2호, 2001, pp.29~36
4. B. S. Smith, A., Coull, "Tall Building Structures : Analysis and Design", *John & Sons, Inc.*, 1991
5. E. L. Wilson, J. P. Holling and H. H. Dovey, "Three Dimensional Analysis of Building Systems", 1995