

합성부재를 이용한 고층평면골조의 강성최적설계에 관한 연구

A Study on Stiffness-based Optimal Design of Tall Plane Frameworks using Composite Member

김 호 수* 이 한 주**
Kim, Ho - Soo Lee, Han - Joo

요 약

본 연구에서는 횡하중을 받는 합성부재를 이용한 고층평면골조의 횡변위를 정량적으로 제어할 수 있는 효율적인 강성최적설계기법을 제시하고자 한다. 이를 위해 합성부재를 이용한 고층 구조물의 거동특성을 고려한 민감도 해석을 수행하며, 아울러 수학적계획법의 일반성을 유지하면서도, 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념을 도입하여 구속조건식을 설정한다. 특히 초기에 주어진 단면형상이 최적설계 과정동안 계속 유지된다는 가정을 이용하여 최적설계결과에서 구해진 단면특성에 따라 합성부재의 치수를 산출하는 방안을 강구한다. 제시된 정량적인 횡변위 제어 방안의 효용성을 검토하기 위해 두가지의 50층 골조 예제가 고려된다.

Abstract

This study presents an effective stiffness-based optimal technique to control quantitatively lateral drift for tall frameworks using composite member subject to lateral loads. To this end, displacement sensitivity depending on behavior characteristics of tall frameworks is established and approximation concept that preserves the generality of the mathematical programming and can efficiently solve large scale problems is introduced. Specifically, under the 'constant-shape' assumption, resizing technique of composite member is developed. Two types of 50 story frameworks are presented to illustrate the features of the quantitative lateral drift control technique proposed in this study.

키워드: 강성최적설계, 근사화개념, 민감도 해석, 합성부재

keyword : Stiffness-based Optimal Design, Approximation Concept, Sensitivity Analysis, Composite Member

1. 서 론

건축 구조물이 고층화됨에 따라 일반적으로 중력방향 하중보다 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 사용성뿐만 아니라 P- δ 효과 등에 의한 이차적 응력의 유발로 인

한 구조물의 안전성에도 큰 영향을 주는 중요한 요소이다. 그러나 많은 구조설계 프로그램들은 설계 기준에 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 거동 특성이 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. 이에 따라 국내외에 횡변위를 정량적으로 제어하기 위한 연구들이 진행되어 왔다^{[5],[6]}. 그러나

* 정회원, 청주대학교 건축공학과, 교수, 공학박사
Tel: 043-229-8483, Fax: 043-229-8483
E-mail: hskim@chongju.ac.kr

** 정회원, 청주대학교 건축공학과, 겸임교수, 공학박사
E-mail: han_joo@hanmail.net

이러한 연구들은 대부분 철골이나 철근콘크리트구조 등에 국한되어 있고 합성부재를 고려하고 있지 않다. 근래의 고층건물들이 많은 경우 합성부재를 사용하고 있다는 점을 감안하면, 실용성이나 효용성을 높이기 위해서 합성부재를 고려한 고층건물의 횡변위 제어가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 합성부재를 이용한 고층 평면구조물의 횡변위를 정량적으로 제어할 수 있는 강성최적설계 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념을 도입하여 횡변위 구속조건식을 설정한다. 아울러 합성부재단면을 고려한 단면특성관계식을 설정하여 강성행렬을 구성하는 여러 단면특성들을 하나의 단면특성에 대한 식으로 나타냄으로써 설계변수의 수를 줄여준다. 또한 설정된 단면특성관계식을 이용하여 강성행렬에 대한 민감도 해석 및 변위에 대한 민감도 해석을 수행한다. 초기에 주어진 단면형상이 최적설계 과정동안 계속 유지된다는 가정을 이용하여 최적설계결과에서 구해진 단면특성에 따라 합성부재의 치수를 산출하는 방안을 강구한다. 제시된 강성최적설계 방안의 효용성을 검토하기 위해 두 가지 종류의 50층 골조가 고려된다.

2. 강성최적설계 정식화

2.1 근사화 개념을 이용한 횡변위구속조건식 설정

강성구속조건에 따른 고층철골구조물의 최적화 문제는 (1)식과 같은 횡변위 구속조건을 포함하게 된다.

$$d_i h_i - u_i(x) \geq 0 \quad (1)$$

여기서 $u_i(x)$ 는 최상층 횡변위, d_i 는 최상층 허용 횡변위비, h_i 는 건물전체높이를 의미한다. 최상층 횡변위는 구조해석을 하지 않고도 수정된 부재단면에 의한 최상층 변위를 근사적으로 알 수 있는 일차 테일러 전개식을 이용하여 다음 (2)식과 같이 근사화될 수 있다.

$$u_i(x) = u_i^o + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^o (x_j - x_j^o) \quad (2)$$

여기서 윗첨자 'o'는 현 설계단계에 대해 구해진 값들을 나타내며, x_i 는 최적화 과정을 통해 구해지는 다음단계에서의 단면크기(단면적 또는 단면이차모멘트)이다. 또한 $\partial u_i / \partial x_i$ 는 단면크기변수 x_i 에 대한 최상층 변위의 변화율인 변위민감도이다.

2.2 민감도 해석 알고리즘

최상층 변위 u_i 는 (3)식과 같이 구조물의 전체 절점변위벡터 \underline{u} 와 연관된다.

$$u_i = \underline{b}_i^T \underline{u} \quad (3)$$

여기서 \underline{b}_i 는 최상층 변위 u_i 와 전체절점변위벡터 \underline{u} 를 연관시켜주는 상관벡터로서 최상층 변위 자유도에 해당하는 항은 '1'이고 나머지 항은 모두 '0'이 된다.

단면크기변수 x_i 에 대한 최상층 변위 u_i 의 변위민감도를 구하기 위해서 (3)식을 x_i 에 대해 편미분하면 다음 (4)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \underline{b}_i^T \frac{\partial \underline{u}}{\partial x_i} + \underline{u}^T \frac{\partial \underline{b}_i}{\partial x_i} = \underline{b}_i^T \frac{\partial \underline{u}}{\partial x_i} \quad (4)$$

여기서 벡터 \underline{b}_i 는 매개변수 x_i 의 변화와 무관하므로 $\partial \underline{b}_i / \partial x_i = 0$ 이 된다. $\partial u_i / \partial x_i$ 는 단면크기변수 x_i 에 대한 최상층 변위의 변화율인 변위민감도이다. 변위민감도를 구하기 위해서는 먼저 단면크기변수 x_i 에 대한 전체변위의 변화율을 구해야 한다. 따라서 (5)식과 같은 평형조건식을 매개변수 x_i 로 편미분하여 정리하면 (6)식과 같이 된다. 여기서 \underline{K} 는 전체강성행렬이고, \underline{u} 와 \underline{p} 는 각각 그에 따른 전체절점변위 벡터와 하중벡터를 나타내며, n 은 부재수를 나타낸다. 또한 하중벡터 \underline{p} 는 매개변수 x_i 의 변화와 무관한 것으로 가정된다.

$$Ku = p \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_i} u \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

(4)식에 (6)식을 대입하여 정리하면 (7)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -b_i^T K^{-1} \frac{\partial K}{\partial x_i} u \quad (7)$$

또한 식 (7)에 단위가상하중이 곱해진다고 가정하면 식 (8)과 같이 된다. 이 식은 가상일 등가의 조건을 정의하고 있으며 u 는 실제 변위이기 때문에 b_i 를 가상하중의 벡터로 고려할 수 있다.

$$1 \cdot u_i = b_i^T \cdot u \quad (8)$$

b_i 를 가상의 하중벡터로써 적용하면 가상절점변위벡터 v_i 에 해당하는 벡터는 (9)식과 같이 된다.

$$v_i = K^{-1} b_i \quad (9)$$

(9)식을 (7)식에 대입하여 정리하면 (10)식과 같은 단면크기변수 x_i 에 대한 최상층 변위 u_i 의 변위민감도가 구해진다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{x_i} (v_i^T K_i u) \quad (10)$$

근사화된 최상층 변위를 변위구속조건식에 대입하여 정리하면 다음 (11)식과 같이 된다.

$$d_i h_i - u_i^0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^0 (x_i - x_i^0) \geq 0 \quad (11)$$

여기서 $d_i h_i - u_i^0$ 는 Δu_i 로, 변위민감도 $(\partial u_i / \partial x_i)^0$ 는 C_{ii} 로 그리고 $x_i - x_i^0$ 를 Δx_i 로 대치하면 음함수 형태의 변위구속조건식은 다음 (12)식과 같이 간소화된 양함수 형태가 된다.

$$\Delta u_i - \sum_{i=1}^n C_{ii} \Delta x_i \geq 0 \quad (12)$$

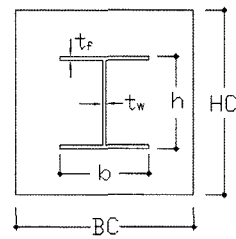
2.3 합성부재의 단면특성관계식 설정

본 연구에서는 철골-철근콘크리트 합성부재의 강성은 콘크리트 단면*과 철골단면이 구조적으로 완전 합성된 것으로 가정하여 등가환산단면성질 형태로 고려된다. 등가환산단면의 계산에서 강재의 탄성계수(E_s)와 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 철골-철근콘크리트 규준**에 명기된 수치를 사용하되, E_c 의 값은 EUROCODE4에 따라 20% 감소한 값을 사용한다. 이에 따라 합성부재의 등가환산 단면적과 단면이차모멘트는 (13), (14)식과 같다.

$$A_{eq} = A_s + 0.8 \frac{E_c}{E_s} A_c \quad (13)$$

$$I_{eq} = I_s + 0.8 \frac{E_c}{E_s} I_c \quad (14)$$

여기서, A_s 는 철골의 단면적, A_c 는 콘크리트의 단면적, I_s 는 철골의 단면이차모멘트, I_c 는 콘크리트의 단면이차모멘트, E_s 는 철골의 탄성계수, E_c 는 콘크리트의 탄성계수를 나타내며, 그림 1과 같은 합성단면에 대해서는 (15)과 같이 구할 수 있다.



〈그림 1〉 합성단면

$$A_s = b \cdot h - (b - t_w) \cdot (h - 2t_f) \quad (15a)$$

$$A_c = BC \cdot HC - A_s \quad (15b)$$

$$I_s = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - t_w)(h - 2t_f)^3}{12} \quad (15c)$$

* 철근의 단면은 콘크리트 단면에 포함된 것으로 가정

** SSRC79(Structural Stability Research Council, 1979, USA)

$$I_c = \frac{BC \cdot HC^3}{12} - I_s \quad (15d)$$

일반적으로 구조물의 강성행렬은 여러가지 단면 특성을 갖게 되는데 이 경우 특정한 단면특성을 주설계변수로 설정하고 나머지 단면특성을 부설계변수로 하여 주설계변수와 부설계변수 사이에 적절한 단면특성관계식을 설정하여 줌으로써 전체 설계변수의 수를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 직사각형, 원형 등 정형적인 형상을 갖는 단면에 대해서는 정확하지만 표준철골단면에 대해서는 근사적인 특성을 갖는 (16)식과 같은 단면특성관계식을 이용한다.

$$S_{ik} = C_{1k} x_i^{C_{2k}} + C_{3k} \quad (16)$$

여기서, x_i 는 주설계변수로 본 연구에서는 부재 i 의 단면적을 나타내고, S_{ik} 는 부설계변수로 부재 i 의 단면적외의 다른 단면특성을 나타낸다. 즉, 평면 골조구조물에서는 단면이차모멘트가 부설계변수가 된다.

(16)식과 같은 단면특성 관계식에 따라 그림 1의 합성단면의 단면특성관계식을 설정하면 (17)식과 같이 된다.

$$I_{eq} = C_1 \cdot A_{eq}^{C_2} + C_3 \quad (17)$$

여기서,

$$C_1 = k_1(1 - 0.8n) ; \quad C_2 = 1.0$$

$$C_3 = 0.8n \frac{BC \cdot HC^3}{12} + (1 - 0.8n)(k_2 - 0.8nk_1A_c)$$

$$n = E_c/E_s ; \quad k_1 = \frac{1}{12}(h - 2t_f)^2$$

$$k_2 = \frac{1}{12}bh[h^2 - (h - 2t_f)^2]$$

2.4 강성행렬 민감도 해석 및 정식화 과정

구조물의 전체 구조강성행렬은 식 (18)과 같이 구조물을 구성하는 각 요소들의 강성행렬의 조합으로 나타낼 수 있다. 또한 각 요소의 강성행렬은 식 (19)과 같이 강성행렬에 기여하는 단면특성에 대한

조합으로 나타낼 수 있다.

$$[K]_T = \sum_{i=1}^n [k]_i \quad (18)$$

$$[k]_i = \sum_{k=1}^t [k]_{ik} \quad (19)$$

여기서, i : 요소번호, j : 단면특성 종류번호

$[K]_T$: 구조물의 전체 강성행렬

$[k]_i$: 요소 i 의 강성행렬

$[k]_{ik}$: k 번째 단면특성에 의해 기여되는 요소 i 의 강성행렬

x_i 에 대한 전체 강성행렬의 민감도해석을 수행하기 위해 전체 강성행렬을 x_i 에 대해 편미분하여 정리하면 (20)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial [K]_T}{\partial x_i} = \frac{\partial [k]_i}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left(\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

여기서 $\partial [k]_{ik}/\partial x_i$ 는 체인룰(chain rule)을 이용하여 (21)식과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial x_i} = \frac{\partial [k]_{ik}}{\partial S_{ik}} \cdot \frac{\partial S_{ik}}{\partial x_i} \quad (21)$$

또한 $\partial S_{ik}/\partial x_i$ 는 단면특성관계식에 의해 (22)식과 같이 정리되고, $\partial [k]_{ik}/\partial S_{ik}$ 는 $[k]_{ik}$ 가 부설계변수인 각각의 단면특성에 대해 선형관계이므로 (23)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_{ik}}{\partial x_i} = C_{1k} C_{2k} x_i^{(C_{2k}-1)} \quad (22)$$

$$\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial S_{ik}} = \frac{[k]_{ik}}{S_{ik}} \quad (23)$$

(21), (22), (23)식을 (20)식에 대입하여 정리하면 (24)식과 같이 요소 i 의 단면적에 대한 전체 강성행렬의 민감도를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial [K]_T}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left[\frac{[k]_{ik}}{S_{ik}} \cdot C_{1k} \cdot C_{2k} \cdot x_i^{(C_{2k}-1)} \right] \quad (24)$$

본 연구에서 제시된 설계법은 현재 단계의 최상층 변위가 허용변위를 초과할 경우 허용변위와 같아지도록 제어되면서 이에 필요한 강성의 변화량이 최소가 되도록 하는 것을 목적으로 한다. 또한 각 부재의 중량계수를 고려함으로써 최소강성뿐만 아니라 최소중량에 대한 사항도 포함되도록 한다. 이를 식으로 나타내면 다음 (25)식과 같다.

$$\text{Minimize: } \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 \quad (25a)$$

$$\text{Subject to: } \Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i = 0 \quad (25b)$$

여기서 ω_i 는 부재의 중량계수(비중×부재길이)이다. 위의 최적화 문제를 라그랑지 승계수법[1]을 이용하여 변환하면 다음 (26)식과 같다.

$$L(\Delta x_i, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 + \lambda \left(\Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i \right) \quad (26)$$

여기서 λ 는 라그랑지 승계수이다. (26)식의 최적화 문제에 대한 필요조건은 다음 (27)식과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta x_i} = \omega_i \Delta x_i - \lambda C_{it} = 0 \quad (27a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i = 0 \quad (27b)$$

(27a)식을 Δx_i 에 대해 정리하여 (27b)식에 대입하고 이를 다시 λ 에 대해 정리하여 (27a)식에 역대입하면 다음 (28)식이 구해진다.

$$\Delta x_i = \frac{C_{it}}{\omega_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_{it}^2}{\omega_i}} \cdot \Delta u_t \quad (28)$$

라그랑지 함수인 (26)식의 헤시안(Hessian)행렬은 중량계수로 이루어지는 대각행렬이 되며, 중량계수들은 모두 양수가 되므로 위에서 구한 (28)식은 최적해가 된다.

2.5 합성부재의 단면치수 재산정 방안

본 연구에서 강구되는 강성최적설계방안은 근사화 개념을 이용하기 때문에 근본적으로 반복과정을 수반하게 된다. 어느 최적설계과정을 통해 구해진 최적의 부재 단면적을 다음 단계에 반영하기 위해서는 부재 단면크기를 재산정하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 초기에 주어진 단면형상이 반복되는 최적설계과정 동안 계속 유지되면서 단면크기가 변경되는 것으로 가정한다. 또한 최적설계의 최종단계에서 구해지는 부재의 단면크기도 같은 방법으로 산정된다.

그림 1과 같은 합성단면의 각 치수를 (29)식과 같이 t_w 에 대한 비율로서 나타내면, 단면적이 주어졌을 때 (30)식과 같이 t_w 를 각 치수의 비율을 이용하여 구할 수 있다. 또한 구해진 t_w 를 이용하여 초기에 주어진 비율에 따라 단면의 각 치수를 구할 수 있다. 여기서 각 치수의 비율은 단면형상이 최적설계과정 동안 계속 유지된다고 가정하기 때문에 초기에 주어진 값이 계속 사용된다.

$$\text{콘크리트 단면: } BC = \gamma_1 t_w, \quad HC = \gamma_2 t_w \quad (29a)$$

$$\text{철골단면: } h = \gamma_3 t_w, \quad b = \gamma_4 t_w, \quad t_j = \gamma_5 t_w \quad (29b)$$

$$t_w = \sqrt{\frac{A_{eq}}{0.8nr_1r_2 + (1-0.8n)t_1}} \quad (30)$$

$$\text{여기서, } t_1 = r_3r_4 - (r_4 - 1)(r_3 - 2r_5)$$

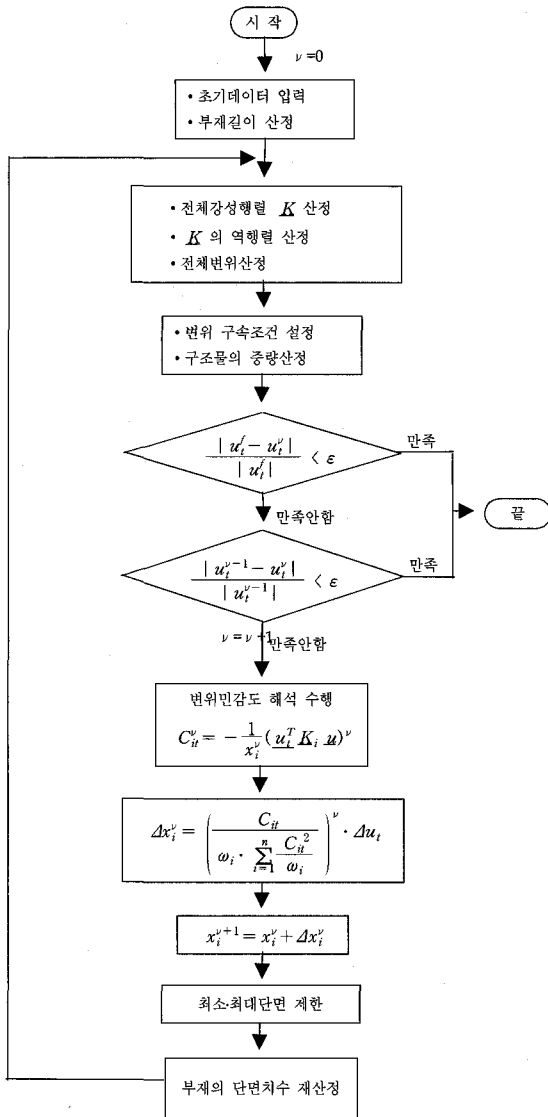
3. 최적화알고리즘 전개과정

본 연구에서 제안된 바와 같이 횡변위 구속조건을 받는 고층철골조의 강성최적설계에 대한 전체 최적화 과정은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

(1) 먼저 초기 부재단면크기를 가정한다. 주로 허용된 단면범주 이내에서 가장 작은 단면으로 가정된다.

(2) 구조해석을 수행하여 전체변위를 구한다.

(3) 구해진 변위를 가지고 수렴성 검토를 수행하는데, 먼저 허용변위와 현단계에서 구해진 최상층 변위의 차이가 허용변위의 0.5%이내일 경우에 수



〈그림 2〉 최적설계 흐름도

렴하는 것으로 간주한다. 만일 앞에서의 수렴조건을 만족하지 못했다면 다음 수렴조건으로 전 단계의 최상층 변위와 현재 단계의 최상층 변위차가 전 단계 변위의 0.5% 이내인지를 검토한다. 이 기준이 만족되면 연속된 반복과정을 통해 얻어지는 향상된 설계결과가 매우 적다고 판단하고 멈춘다.

(4) 만일 두 수렴조건 모두 만족되지 않았다면 설계 민감도 해석을 수행한다.

(5) 식 (28)을 이용하여 Δx_i 를 구하고 이를 다음 설계단계의 단면데이터로 이용하기 위해 구해진 Δx_i 에 현재 설계단계의 단면크기를 더한다.

(6) 더해진 단면크기가 허용 단면범주내의 최소 단면크기 이하인 것은 최소단면으로 대입하고, 최

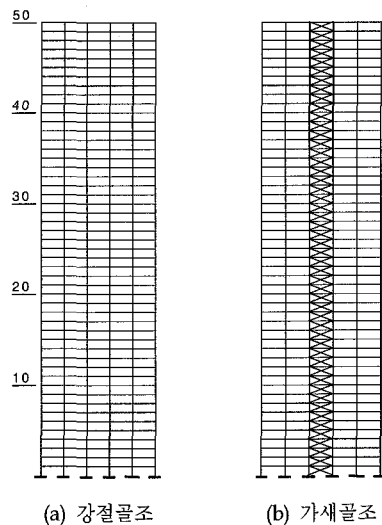
대단면크기 이상인 것은 최대단면으로 대입한다.

(7) 부재의 단면치수를 재산정한다.

위와 같이 부재의 단면이 선정되면 다시 단계 2로 되돌아가서 수렴조건이 만족될 때까지 단계 2부터 단계 7까지 과정을 반복한다. 이와 같은 과정을 흐름도로 나타내면 그림 2와 같다.

4. 적용결과 및 분석

본 연구에서 제시된 합성부재를 이용한 고층골조의 횡변위 제어방안의 효율성을 비교·검토하기 위하여 그림 3과 같은 두 가지 형태의 5베이 50층 골조모델이 고려된다. 적용 예제는 층고 3.6m, 베이간격 6m인 5베이 50층 구조물이다. 첫 번째 모델(강절골조)은 횡하중을 보와 기둥 그리고 접합부의 휨저항에 의해 저항하는 강절골조이고, 두 번째 모델(가새골조)은 주로 중앙베이에 기둥과 가새의 축강성으로 횡하중을 저항하는 가새보강된 강절골조이다. 두 모델의 재질은 철골은 SS400, 콘크리트는 C240으로 설정한다. 프레임을 구성하는 모든 보와 기둥은 강절점으로 연결되어 있으며 가새 트러스는 힌지절점으로 연결된다. 각 예제의 폭에 대한 높이의 비는 6.0으로 고층건물의 세장비를 가지고 있다. 허용최상층변위는 건물전체높이의 1/600 (30cm)로 한다. 최적설계의 수렴은 제어된 횡변위와 제어하려는 횡변위의 차이가 0.5%이내일 때 만족되는 것으로 가정한다.



〈그림 3〉 5베이 50층 골조모델

초기의 단면은 표 1과 같이 부재종류별로 전층에 같은 단면으로 가정한다. 특히 기둥은 합성부재로서 그림 1과 같은 단면형상으로 가정한다. 또한 실용성을 고려하여 같은 층의 부재를 종류별로 같은 그룹으로 가정한다.

〈표 1〉 초기부재 단면크기

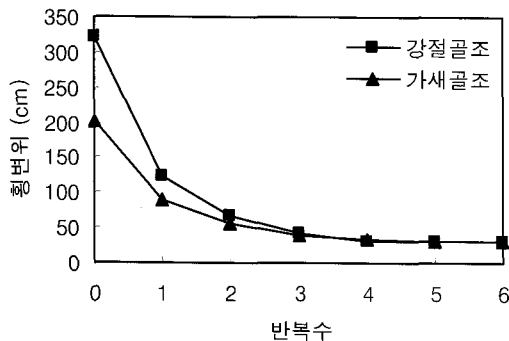
부재종류	단면크기
기둥(합성단면)	■-500x500, H-350x350x12x19
보	H-400x200x8x13
가새	H-200x200x8x12

수평풍하중은 노풍도 B, 기본풍속 35m/sec, 중요도 계수 1.0, 분담폭 8m로 가정하여 각 층의 레벨에서 수평집중하중으로 작용하는 것으로 계산하며, 표 2는 적용된 풍하중을 나타낸 것이다[7].

〈표 2〉 적용된 풍하중 (tonf)

층	하중	층	하중	층	하중	층	하중	층	하중
50	4.27	40	7.73	30	6.80	20	5.68	10	4.17
49	8.46	39	7.64	29	6.70	19	5.55	9	3.98
48	8.38	38	7.56	28	6.60	18	5.42	8	3.78
47	8.30	37	7.47	27	6.49	17	5.28	7	3.56
46	8.22	36	7.38	26	6.38	16	5.14	6	3.33
45	8.14	35	7.28	25	6.27	15	5.00	5	3.07
44	8.06	34	7.19	24	6.16	14	4.85	4	2.78
43	7.98	33	7.10	23	6.04	13	4.69	3	2.44
42	7.90	32	7.00	22	5.93	12	4.53	2	2.04
41	7.81	31	6.90	21	5.80	11	4.35	1	2.25

그림 4는 각 모델의 반복과정에 따른 제어변위를 나타낸 것인데, 두 모델 모두 6회의 반복과정으로



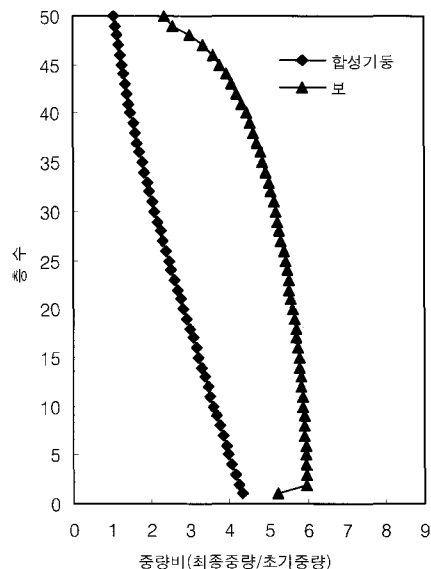
〈그림 4〉 반복과정에 따른 변위이력

수렴이 일어났으며 수렴되는 동안 안정적으로 변위가 제어되는 것이 보여진다. 이것은 제안된 설계알고리즘내에 근사화 개념이 도입되어 수학적계획법을 보완함으로써 변위가 안정적으로 제어될 뿐만 아니라 고층건물과 같은 큰 규모의 문제도 적은 반복과정으로 풀려질 수 있음을 보여준다.

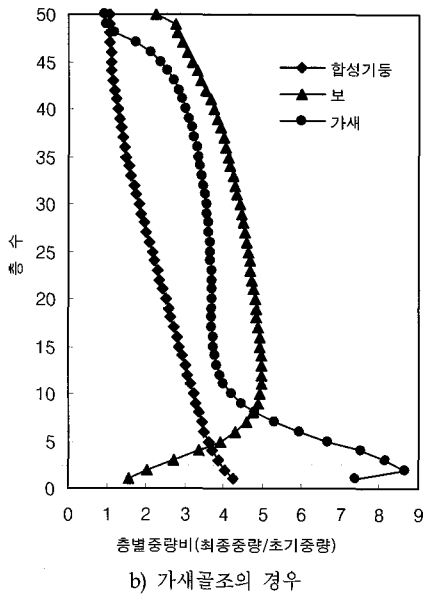
표 3은 적용예제의 반복과정에 따른 부재별 중량이력을 나타낸 것인데, 가새골조의 최종중량이 강철골조에 비해 철골의 경우 0.84%, 콘크리트의 경우 12.44% 더 적은 것으로 나타났다. 이것은 횡하중저항시스템을 적절하게 배치할 경우 큰 횡하중저항성능을 얻을 수 있음을 보여준다. 이와 같이 제안된 설계법을 통해 고층철골건물의 초기설계단계에서 횡하중저항시스템에 대한 여러 가지 대안을 비교검토하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

〈표 3〉 적용예제의 부재별 중량이력 (tonf)

반복수	강철골조				가새골조			
	합성기둥		보	합성기둥		보	가새	
	철골	콘크리트	철골	철골	콘크리트	철골	철골	
0	144.5	603.8	96.5	144.5	603.8	96.5	34.1	
1	152.9	639.0	211.2	160.9	672.2	194.8	53.1	
2	211.1	882.2	304.8	209.0	873.3	260.3	77.9	
3	290.7	1214.9	407.9	263.6	1101.7	328.2	103.7	
4	345.2	1442.5	470.6	302.0	1262.2	371.0	120.8	
5	360.6	1506.9	487.6	318.0	1328.8	388.0	128.0	
6	362.2	1513.7	489.3	322.2	1346.3	392.4	130.0	



a) 강철골조의 경우



〈그림 5〉 적용예제의 층별중량비

그림 5는 적용예제의 층별 중량비를 부재별로 나타낸 것인데, 합성기둥의 경우 층의 증가에 따라 물량이 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 반면 보 및 가새의 경우 대체로 층의 변화에 상관없이 일정한 비율을 나타낸다. 따라서 고층건물의 시공성이나 실용성을 고려할 때, 보 및 가새는 층의 변화에 상관없이 일정하고 기둥은 층이 높아짐에 따라 점차적으로 단면이 적어지는 효율적인 결과를 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 합성부재를 이용한 고층평면골조의 정량적인 횡변위제어를 위해 근사화 개념 및 민감도해석기법을 이용한 최적화방안을 제시하였으며, 알고리즘의 타당성 또는 효율성을 검토하기 위해 예제에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안된 최적화 알고리즘은 합성부재를 이용한 고층구조물 예제에 대해 6회 이내의 적은 반복과정을 통해 허용변위로 수렴됨으로써 안정적으로 횡변위를 제어하는 것으로 나타났다. 이는 제안된 최적화 알고리즘내에 근사화 개념이 도입되어 수학적 계획법을 보완함으로써 변위가 안정적으로 제어될 뿐만 아니라 고층건물과 같은 큰 규모의 문제도 적은 반복과정으로 풀려지는 것으로 사료된다. 특히 층별 중량비를 부재별로 비교해본 결과 합성기둥은 층이 높아짐에 따라 점차적으로 줄어들고 보 및 가

새는 일정한 경향으로 나타났는데, 이는 시공성을 고려할 때 효율적이다. 아울러 층별 부재 그룹화 기법을 적용하여 설계변수의 수를 줄여줌으로써 계산량과 계산시간의 감소효과를 얻을 수 있으며 시공상의 효율성도 만족시킬 수 있다. 이와같이 제안된 최적화 기법을 통해 합성부재를 이용한 고층건물의 초기설계단계에서 횡하중저항시스템에 대한 여러 가지 대안을 비교·검토하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C103A1040001-03A0204-00110)에 의한 것임

참고문헌

- Haftka R. T. and Gurdal Z., Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Pub., 1992.
- Vanderplaats, G. N., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design of Optimal with Applications, McGraw-Hill, New York, 1984.
- Schmit, L. A. and Farshi, B., "Some Approximation Concepts for Structural Synthesis," AIAA Journal, Vol. 11, pp.489-494, 1974.
- Kirsch, U., "Reduced Basis Approximations of Structural Displacements for Optimal Design, AIAA Journal," Vol. 29, pp.1751-1758, 1991.
- Grierson, D.E. and Chan, C.M., "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, pp.17-32, 1993.
- 이한주, 김호수, "근사화개념과 민감도해석기법을 이용한 고층철골조의 강성최적설계," 대한건축학회 논문집, 17권, pp.29-36, 2001.
- 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000.