

횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위설계를 위한 재분배기법 개발

Development of Resizing Techniques for Drift Designs of High-rise Buildings subjected to Lateral and Vertical Loads

서 지 현*

Seo, Ji-Hyun

박 호 선†

Park, Hyo-Seon

(논문접수일 : 2003년 7월 30일 ; 심사종료일 2004년 2월 9일)

요 지

고층 건물의 구조시스템 및 물량은 최대변위 및 층간 변위 제어를 포함하는 강성설계에 의해서 결정되는 경향이 있으나 강도 설계와는 달리 특정 소수 부재의 단면 변화로 강성제한 조건을 만족시키기는 어렵다. 이러한 이유로 이제까지의 고층건물 구조 설계는 설계자의 경험과 직관에 의존한 반복적인 설계과정을 피할 수 없었다. 그러므로 본 연구에서는 민감도 해석이나 반복적인 구조해석 없이 변위를 제어할 수 있는 실용적인 고층건물 변위제어기법을 제안하였다. 기존 연구에서 개발된 재분배기법은 구조물이 횡하중을 받는 경우만을 고려하였으나 실제 구조물은 횡하중과 연직하중을 동시에 받고 있으므로 이를 고려한 재분배기법을 개발하였다. 개발된 횡하중과 연직하중을 고려한 재분배기법을 강도설계모델과 결합하여 고층건물 변위설계 모델을 제안하였으며 제안된 변위설계모델을 20층 강접골조 전단벽 구조물과 60층 아웃리거 구조물의 변위설계에 적용하여 기존의 횡하중만을 고려한 변위설계모델의 결과와 비교 분석하였다.

핵심용어 : 고층건물, 변위설계, 최적화, 재분배기법

Abstract

Drift design of a high-rise building is a governing factor in the determination of structural weights and lateral resisting systems. However, high-rise buildings are composed of tens of thousands of structural member, designer can not know which members are active to lateral drift control and how much they contribute to lateral drifts. Resizing technique was proved to be a practical method for drift design of high-rise buildings. However, no resizing algorithm has been considered the effect of vertical loads in drift designs. Thus, in this paper, a resizing algorithm has been developed for drift designs of high-rise buildings subjected to both lateral and vertical loads. The drift design model has been applied to drift designs of two high-rise building examples.

keywords : high-rise buildings, drift designs, optimization, resizing techniques

1. 서 론

고층건물 설계에 있어서, 풍하중이나 지진하중에 의한 횡 변위 및 진동 제어와 같은 사용성 문제는 강도설계보다 중요한 구조설계 결정인자이다. 실제로 초고층 건물의 구조시스템 및 물량은 이러한 사용성 문제에 의해서 결정되는 경향이 있

다. 대부분의 주거 및 사무용 초고층 건물 구조물의 형상은 건축적 요구에 의해서 미리 결정되어지며, 구조 설계자는 결정된 구조형상 내에서 안전성을 만족시킨 후 사용성을 검토하고 만족시키는 최적의 단면을 찾게 된다. 안전성은 해당 부재의 단면성능을 직접적으로 변화시켜 만족시킬 수 있으나 구조물의 수평변위 및 층간변위 등을 포함하는 구조물의 사용성은

† 책임저자, 정회원 · 연세대학교 건축 · 도시공학부 부교수

전화: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668

E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

* 연세대학교, 건축 · 도시공학부 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 6월 30일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

특정 소수 부재의 단면 변화로 만족시키기 어렵다. 이러한 이유에서 설계자는 어떠한 부재의 단면 성능을 얼마나 변경하는 것이 사용성 문제 해결에 효과적인지를 판단하기 어려우므로 이제까지의 고층건물 구조설계는 설계자의 경험과 직관에 의존한 반복적인 설계과정을 피할 수 없었다.

한편 O.C.(Optimality Criteria), S.A.(Simulated Annealing), G.A.(Genetic Algorithm) 등과 같은 최적화기법을 이용한 고층건물의 변위제어에 대한 연구가 활발히 진행 중이지만, 이러한 최적화 기법을 이용한 설계법은 반복적인 구조해석과 많은 계산량을 필요로 하는 단점을 가지고 있어 실용적 적용에는 많은 한계를 가지고 있다.

1990년대 초부터 Baker¹⁾, Charney²⁾, Wada³⁾ 등에 의해서 에너지 이론에 근거한 변위제어기법이 제안되었으며, 그 후 에너지법에 근거한 변위제어기법이 재분배기법으로 정식화되어 고층건물의 변위제어에 적용되었다.^{4)~6)} 재분배기법은 에너지 기법을 이용하여 변위기여도를 구하고 이를 최적화 기법을 통해 분배 물량을 결정하는 실용적인 변위제어 방법이다.

그러나 기존 연구^{7)~12)}에서 개발된 재분배기법은 구조물이 횡하중을 받는 경우만을 고려하였으나, 실제 구조물은 횡하중과 연직하중을 동시에 받고 있으므로 횡하중만을 고려한 재분배기법은 실제 구조물의 응력 상태를 적절히 반영하지 못할 수 있다. 특히, 물량 분배의 근거가 되는 변위기여도는 부재 내부에 축적된 변형에너지의 합으로 구해지므로 횡하중이 작용하는 경우와 횡하중과 연직하중이 동시에 작용하는 경우의 변위기여도는 다른 값을 가지며, 또한 재분배 후 각 부재의 강도 검토 결과에도 영향을 미친다. 그러므로 횡하중과 연직하중을 동시에 받는 구조물에 대한 재분배기법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려한 재분배기법을 제안하고 이를 20층 강접골조 전단벽 구조물과 60층 복합 구조물의 변위제어에 적용하였다. 또한 기존에 개발된 횡하중만을 고려한 재분배기법과 성능 및 실용성을 비교 평가하였다.

2. 변위기여도

고층건물 구조설계에서 있어서 변위제어를 포함하는 강성설계는 구조물량과 구조시스템을 결정짓는 중요한 요소로 인식되고 있지만 기존 구조해석 결과에서 강성설계에 대한 정보를 얻을 수가 없다. 최적구조설계 분야에서는 부재 민감도해석을 통해서 제어하고자 하는 변위에 대한 민감도가 높은 부재 또는 부재들의 단면성능을 수정하여 변위제어에 활용할 수 있으나, 고층건물의 부재 또는 자유도수를 감안하면 많은 반복적 구조해석이 요구되는 민감도해석은 실용적이지 못할 수 있다. 이에 반하여 재분배기법은 기존 구조해석 결과에 의한 부재력을 이용하여 횡변위에

대한 각 부재들의 변위기여도를 비교적 간단하게 구할 수 있으며 이는 민감도계수와 같은 의미를 가지게 된다.⁶⁾

변위기여도는 부재력 응력에 근거하여 구해지므로 구조물이 횡하중을 받는 경우와 횡하중과 연직하중을 동시에 받는 경우의 변위기여도는 다르다. 일반적으로 연직하중이 거더에 등분포 하중으로 작용하는 경우 부재력은 횡하중만이 작용하는 경우와는 다른 양상을 나타내므로 변위기여도 계산을 위한 새로운 적분 모듈이 필요하게 된다.

그러므로 먼저 구조물이 횡하중을 받는 경우와 횡하중과 등분포 연직하중을 동시에 받는 경우의 변위기여도 계산을 위한 적분 모듈을 정리하면 다음과 같다.

2.1 횡하중이 작용하는 경우

구조물에 횡하중이 작용하는 경우 부재력(모멘트, 전단력, 축력)은 선형이나 상수 분포를 가지게 되며 실제하중과 단위하중에 의한 모멘트, 전단력, 축력의 분포는 그림 1, 2, 3과 같다. 실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 모멘트는 식(1), (2)와 같이 표현되며 모멘트에 의한 변위기여도(δ^m)는 식(3)과 같이 구해진다.

$$M_x^R = M_2 + \frac{M_1 - M_2}{L} x \quad (1)$$

$$M_x^U = M_4 + \frac{M_3 - M_4}{L} x \quad (2)$$

$$\delta^m = \int_0^L \frac{M_x^R M_x^U}{EI} dx = \frac{L}{6EI} M_4 (M_1 + 2M_2) + \frac{L}{6EI} M_3 (2M_1 + M_2) \quad (3)$$

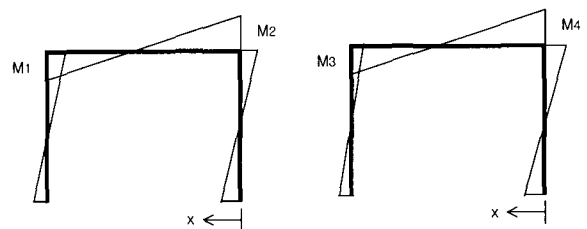


그림 1 횡하중에 의한 모멘트 분포

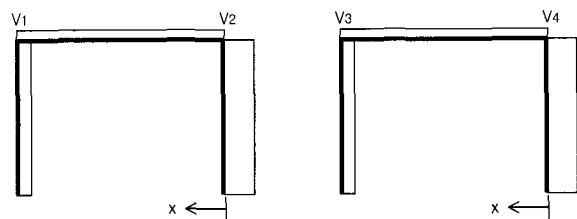


그림 2 횡하중에 의한 전단력 분포

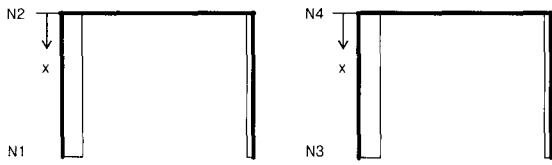


그림 3 횡하중에 의한 축력 분포

실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 전단력은 식(4), (5)와 같이 구해지며 전단력에 의한 변위기여도(δ^v)는 식(6)과 같이 구해진다.

$$V_x^R = V_1 \tag{4}$$

$$V_x^U = V_3 \tag{5}$$

$$\delta^v = \alpha \int_0^L \frac{V_x^R V_x^U}{GA} dx = \alpha \frac{V_1 V_3 L}{GA} \tag{6}$$

실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 축력은 식(7), (8)과 같이 구해지며 축력에 의한 변위기여도(δ^n)는 식(9)와 같이 구해진다.

$$N_x^R = N_1 \tag{7}$$

$$N_x^U = N_3 \tag{8}$$

$$\delta^n = \int_0^L \frac{N_x^R N_x^U}{EA} dx = \frac{N_1 N_3 L}{EA} \tag{9}$$

재분배에 필요한 변위기여도는 각 부재의 모멘트, 전단력, 축력에 의한 변위기여도의 합으로 구해진다.

$$\delta_k = \delta_k^m + \delta_k^s + \delta_k^n \tag{10}$$

여기서, δ_k 는 k번째 부재의 변위기여도를 나타낸다. 그리고 2차원 대칭 구조물에서 변위기여도 δ_k 는 횡하중의 방향과 상관없이 일정하다.

$$\delta_k = \delta_k^{+x} = \delta_k^{-x} \tag{11}$$

여기서, δ_k^{+x} , δ_k^{-x} 는 횡하중이 +x, -x 방향으로 작용할 때 k번째 부재의 변위기여도를 나타낸다.

2.2 횡하중과 연직하중이 동시에 작용하는 경우

구조물이 횡하중과 연직하중을 받는 경우, 부재력(모멘트, 전단력, 축력)은 이차, 선형 또는 상수분포를 가지며 실제하중과 단위하중에 의한 모멘트, 전단력, 축력의 분포는 그림 4, 5, 6과 같다. 실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 모멘트는 식(12), (13)과 같이 표현된다. 또한 모멘트에 의한 변위기여도(δ^m)는 식(14)와 같이 구해진다.

$$M_x^R = M_2 + V_2 x - \frac{\omega}{2} x^2 \tag{12}$$

$$M_x^U = M_4 + \frac{M_3 - M_4}{L} x \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \delta^m &= \int_0^L \frac{M_x^R M_x^U}{EI} dx \\ &= \frac{L}{24} \{ M_3(12M_2 + 4LV_2 - \omega L^2) \\ &\quad + M_4(12M_2 + 8LV_2 - 3\omega L^2) \} \end{aligned} \tag{14}$$

실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 전단력은 식(15), (16)와 같이 구해지며 전단력에 의한 변위기여도(δ^v)는 식(17)과 같이 구해진다.

$$V_x^R = V_2 + \frac{V_1 - V_2}{L} x \tag{15}$$

$$V_x^U = V_3 \tag{16}$$

$$\delta^v = \alpha \int_0^L \frac{V_x^R V_x^U}{GA} dx = \frac{\alpha L V_3 (V_1 + V_2)}{2GA} \tag{17}$$

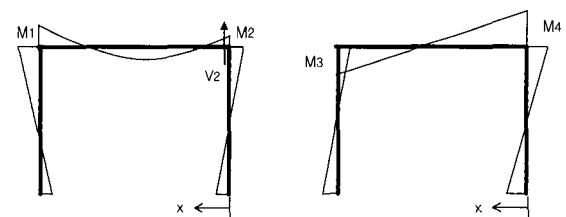


그림 4 횡하중과 연직하중에 의한 모멘트 분포

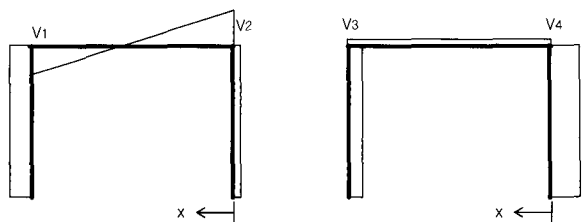


그림 5 횡하중과 연직하중에 의한 전단력 분포

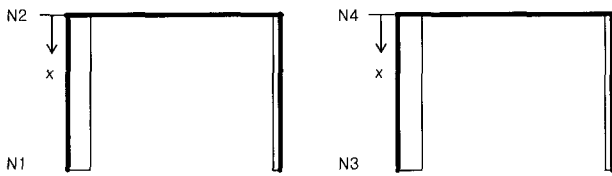


그림 6 횡하중과 연직하중에 의한 축력 분포

횡하중과 연직하중이 작용하는 경우의 축력도 양상은 횡하중이 작용하는 경우와 동일하므로 실제하중과 단위하중에 의한 부재 내 특정 지점 x에서 축력 및 축력에 의한 변위기여도 계산은 식(9)와 동일하게 된다. 부재 변위기여도는 식(10)과 같이 모멘트, 전단력, 축력에 의한 변위기여도의 합으로 표현되지만 부재별 변위기여도는 횡하중의 방향에 따라 다르다.

$$\delta_k^{+x} \neq \delta_k^{-x} \tag{18}$$

3. 재분배 기법을 위한 정식화

본 연구에서 제어하고자 하는 고층 구조물의 최상층 변위는 각 부재들의 변위기여도의 합으로 표현되며 대표적인 횡력저항 시스템인 철골 프레임-전단벽 구조의 경우 변위는 철골 부재와 철근 콘크리트 전단벽 부재의 변위기여도의 합으로 표현된다.

$$\delta = \sum_{i=1}^{ms} \delta_i + \sum_{j=1}^{mc} \delta_j \tag{19}$$

여기서 δ_i, δ_j 는 각각 i 번째 철골 부재의 변위기여도와 j 번째 철근 콘크리트 부재의 변위기여도를 나타낸다. ms, mc 는 각각 철골 부재 수, 콘크리트 전단벽 부재 수를 나타낸다.

변위기여도는 부재력 별 단면성능(단면적, 단면2차모멘트)에 반비례하나 본 연구에서 단면적을 설계 변수로 사용하였으므로 변위기여도는 단면적과 직접 관련된 물량에 반비례하는 것으로 가정하였다.¹⁴⁾ 목적함수는 최상층의 변위를 최소화하는 것으로, 제약함수는 물량 재분배 전후에 물량의 변화가 없는 것으로서 식(20), (21)과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } \delta = \sum_{i=1}^{ms} \frac{\delta_i}{\beta_i} + \sum_{j=1}^{mc} \frac{\delta_j}{\beta_j} \tag{20}$$

$$\text{Subject to } W = \sum_{i=1}^{ms} \beta_i W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \beta_j W_j \tag{21}$$

$$\beta_L \leq \beta_j \leq \beta_U \quad j=1, \dots, mc \tag{22}$$

여기서 β_i, β_j 는 각각 i 번째 철골 부재와 j 번째 철근 콘크리트 부재의 물량 수정계수를 나타낸다. W, W_i, W_j 는 각각 전체 물량, i 번째 철골 부재와 j 번째 철근 콘크리트 부재의 물량을 나타낸다. 철근 콘크리트 전단벽 부재는 시공을 고려하여 재분배 후의 전단벽 두께에 경계부 제약(Side constraints)조건을 식(22)와 같이 추가하였다. β_L, β_U 는 각각 철근 콘크리트 물량 수정계수의 상·하한치를 나타낸다. n 은 철근 콘크리트 전단벽 부재의 탄성계수에 대한 철골 부재의 탄성계수의 비를 나타낸다.

위와 같은 제약 최소화 문제는 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 이용하여 무제약 최소화 문제로 치환될 수 있으며 K-T 조건(Kuhn-Tucker Conditions)을 이용하여 분배 물량을 결정하게 된다. 2차원 대칭 구조물에서 횡하중은 두 방향에서 작용될 수 있으며 횡하중만이 작용하는 경우에는 부재 변위기여도와 부재 물량 수정계수가 횡하중의 방향에 관계없이 일정하였다. 그러나 구조물이 횡하중과 등분포 연직하중을 같이 받는 경우 부재 변위기여도는 횡하중의 방향에 따라서 바뀌게 되므로, 물량 수정계수 계산시 둘 중 어떤 변위기여도를 사용하여야 할지 결정하여야 한다. 즉, 구조물이 횡하중과 등분포 연직하중을 동시에 받을 경우, 횡하중 방향에 따라 부재별로 각각 다른 두 개의 변위기여도를 가지게 된다.

본 연구에서는 부재별로 두 개의 변위기여도중 큰 부재 변위기여도를 물량 수정계수 계산에 이용하였으며, 이는 식(23)과 같이 표현된다. 식(23)의 표현은 횡하중 만이 작용하는 경우에도 동일하게 적용될 수 있다.

$$\delta_k^{\max} = \max \{ \delta_k^{+x}, \delta_k^{-x} \} \tag{23}$$

여기서 δ_k^{\max} 는 k 번째 부재의 두 변위기여도 중 큰 값을 의미한다. 위와 같이 δ_k^{\max} 를 이용하여 물량 수정 계수를 구하면 철골 부재와 철근 콘크리트 전단벽 부재의 물량 수정계수는 식(24), (25)와 같이 표현된다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\delta_i^{\max}}{W_i}} \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad i=1, \dots, ms \tag{24}$$

$$\beta_j = \sqrt{n \frac{\delta_j^{\max}}{W_j}} \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad j=1, \dots, mc \tag{25}$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \frac{\sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j}{\sum_{i=1}^{ms} \sqrt{\delta_i^{\max} W_i} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \sqrt{n \delta_j^{\max} W_j}}$$

현재의 단면 성능을 식(24), (25)와 같은 수정계수를 이용하여 수정하면 변위제어를 위한 새로운 단면 성능은 아래와 같이 표현된다.

$$A_i^{new} = A_i^{old} \times \beta_i \quad (26)$$

$$A_j^{new} = A_j^{old} \times \beta_j \quad (27)$$

여기서 A_i^{old}, A_i^{new} 는 각각 i 번째 철골 부재의 초기 단면적과 재분배 후의 단면적을 나타내며, A_j^{old}, A_j^{new} 는 각각 j 번째 철근 콘크리트 부재의 초기 단면적과 재분배 후의 단면적을 나타낸다. 그 외의 단면 성능은 부재 종류별로 단면적과의 관계에 의해서 구해진다. 제안된 변위제어기법은 강도설계 모듈과 결합하여 그림 7과 같은 고층건물 변위설계 모델로 표현될 수 있다. 전체적인 변위설계 순서는 기존 연구^{9),11),13)}와 동일하나 부재 변위기여도와 물량 수정계수가 하중조건에 따라 달라진다.

4. 예 제

4.1 20층 강접 골조 전단벽 구조물

그림 8의 20층 강접골조 전단벽 구조물은 높이 80 m, 밑면길이 36 m이며, 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 전단벽으로 구성되어 있다. 초기 설계에 사용된 철골 부재의 종류와 전단벽의 두께는 표 1과 같으며, 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 $2400\text{kg/cm}^2, 2.1 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 이며, 철근의 항복강도는 4000kg/cm^2 이다. 전단벽의 콘크리트 강도와 탄성계수는 각각 $240\text{kg/cm}^2, 2.3 \times 10^5\text{kg/cm}^2$ 이다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 산정하였으며 건물에 +x, -x 방향으로 작용시켰다. 연직하중은 보에 작용하는 7000kg/m 의 등분포 하중으로 가정하였다. 제어하고자하는 건물 최상층 변위는 건물높이의 $H/500(16\text{cm})$ 로 가정하였다.

표 1 20층 구조물의 초기 설계 부재종류

부재구분	층수	부재종류
기둥	16-20	H-250x255x14x14
	11-15	H-300x300x15x15
	6-10	H-350x350x12x19
	1-5	H-388x402x15x15
보	1-20	H-400x200x8x13
전단벽 두께 (cm)	16-20	20
	11-15	30
	6-10	40
	1-5	50

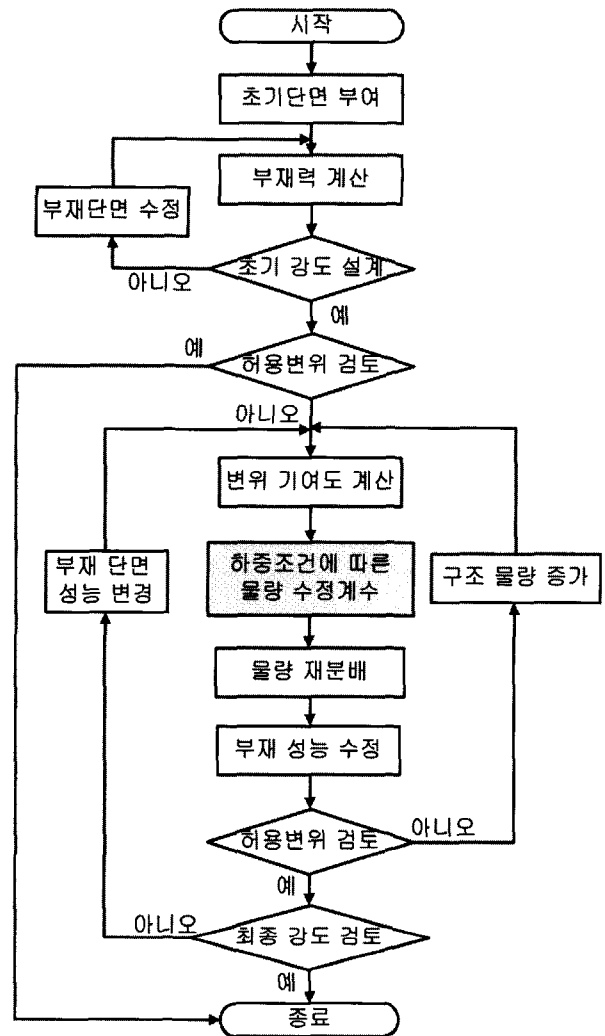


그림 7 고층 구조물의 변위설계 모델

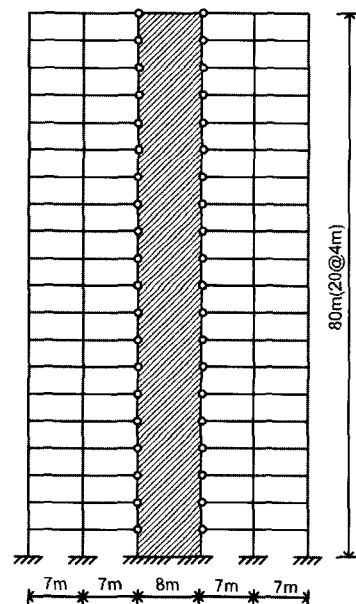


그림 8 20층 예제 구조물

4.1.1 20층 예제 결과 (횡하중 작용 경우)

초기에 결정된 부재와 하중을 이용하여 변위설계 모델로 예측한 구조물 최상층 변위는 횡하중의 방향에 관계없이 21.49cm로서 상용 구조해석 소프트웨어에서 얻어진 21.00cm와 근사하다. 변위설계모델 적용에 따른 부재 종류별 변위 기여도와 물량은 그림 9, 10과 같다. 변위설계모델에 따라 물량을 재분배하면 변위는 그림 9와 같이 17.96cm로 예측되며 이때 전체 물량은 제약조건에 표현된 것과 같이 증감이 없다. 재분배 후 보와 전단벽은 물량이 증가함에 따라 변위기여도는 감소하며, 기둥은 물량이 감소함에 따라 변위기여도가 증가한다. 재분배후 예측 변위 17.96cm는 허용변위 16.00cm를 만족하지 못하므로 허용변위를 만족시키기 위해 물량이 그림 10과 같이 증가되며, 또한 최종 강도설계 단계에서도 일부 부재는 강도조건을 만족시키기 위해 물량이 증가한다. 최종강도설계는 허용응력설계법으로 횡 하중에 대해서 검토하였다.

변위제한과 최종 강도설계 후 물량은 8.6%증가하며 변위는 15.81cm로 예측된다. 검증을 위해 상용구조해석 소프트웨어로 해석한 변위는 14.32cm로서 예측 변위와는 9.4%의 오차를 보인다. 초기설계에 대한 최대 층간변위는 1.43cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계모델 적용 후 최대 층간변위는 1.01cm로 감소하며 16층에서 발생한다.

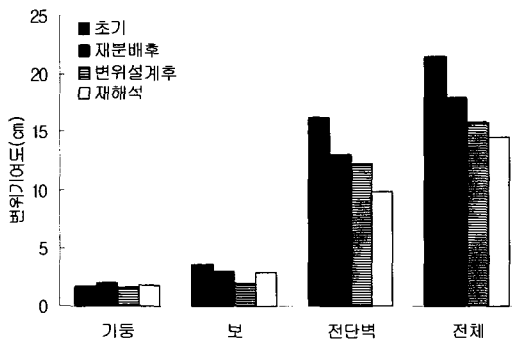


그림 9 20층 변위기여도(횡하중)

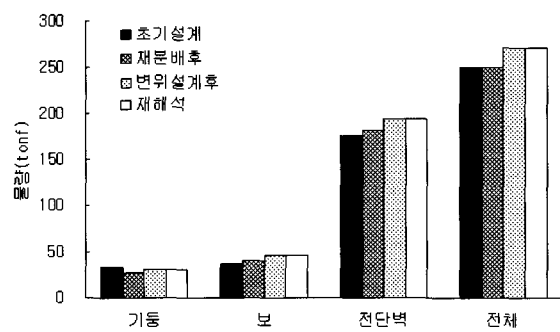


그림 10 20층 물량(횡하중)

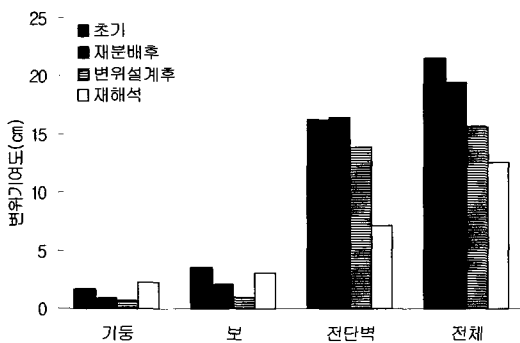


그림 11 20층 변위기여도(횡하중+연직하중)

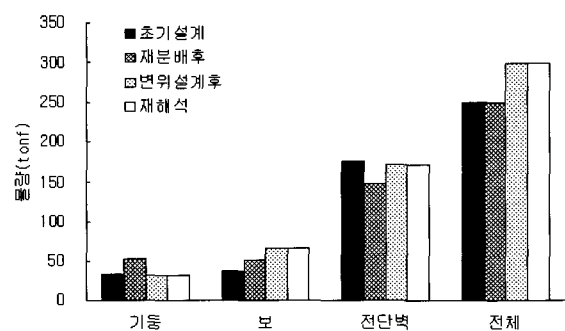


그림 12 20층 물량(횡하중+연직하중)

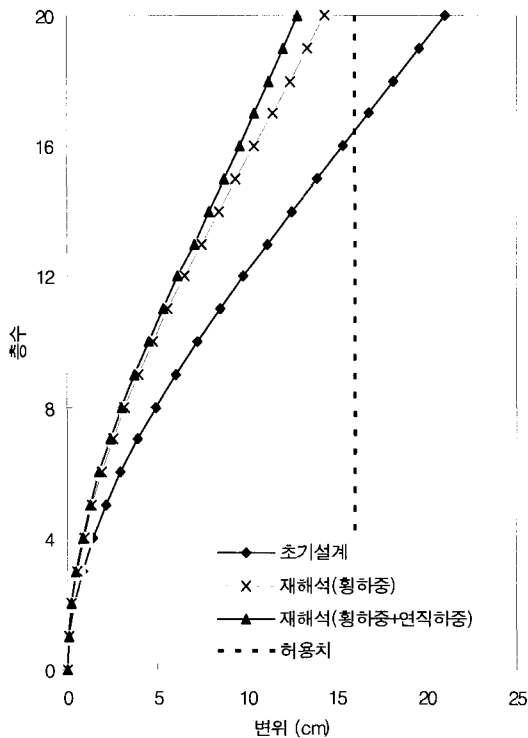


그림 13 20층 구조물의 변위

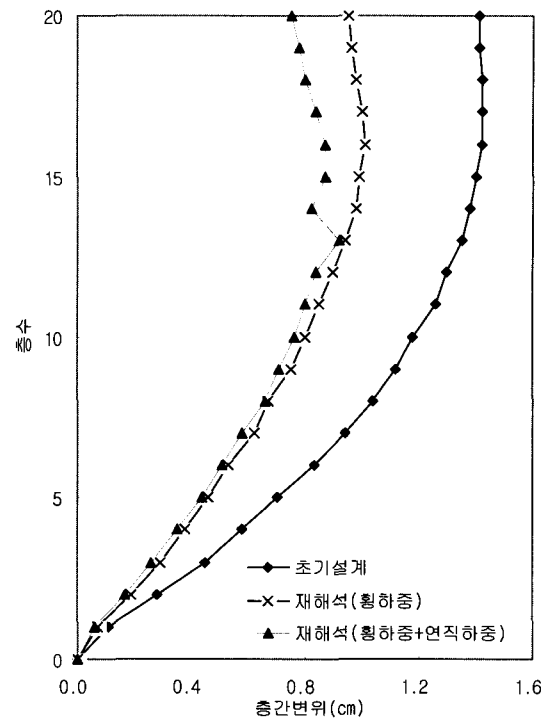


그림 14 20층 구조물의 층간변위

석 소프트웨어로 계산한 변위는 12.79cm로서 예측 변위와는 18.4%의 오차를 보인다. 초기설계에 대한 최대 층간변위는 1.43cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계모델 적용 후 최대 층간변위는 0.92cm로 감소하며 13층에서 발생한다. 구조물이 횡하중을 받는 경우와 횡하중과 연직하중을 받는 경우의 변위설계모델 적용에 따른 변위와 층간변위는 그림 13, 14와 같다.

구조물 최상층 변위는 건물 높이의 1/500 (39cm)로 가정하였다.

4.2 60층 아웃리거 구조물

60층 아웃리거 구조물 예제는 철골, 철근 콘크리트 전단벽 및 아웃리거로 구성된 높이 196.5m, 밑면길이 42.6 m인 복합구조물로서 그림 15와 같다. 아웃리거는 전단벽과는 강접으로 연결되어 있으며, 기둥과는 핀으로 연결되어 있다. 아웃리거 수평부재와 인방보(lintel beam)를 제외한 보 부재는 기둥과 핀으로 연결되어 중력하중만을 부담하게 설계되었다. 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 $3,300\text{kg/cm}^2$, $2.1 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 이며, 철근의 항복강도는 4000kg/cm^2 , 콘크리트 강도 및 탄성계수는 각각 400kg/cm^2 , $2.8 \times 10^5\text{kg/cm}^2$ 이며, 전단벽의 두께는 1-2층, 3-38층, 39-60층에서 각각 90, 70, 50cm로 설계되었다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 산정하였으며 건물에 +x, -x 방향으로 작용시켰다. 연직하중은 보에 작용하는 5880kg/m의 등분포 하중으로 가정하였다. 제어하고자하는

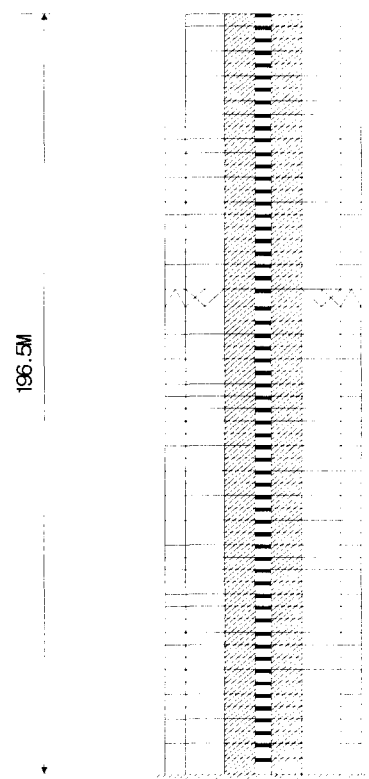


그림 15 60층 아웃리거 구조물

4.2.1 60층 예제 결과 (횡하중 작용 경우)

변위설계모델을 이용하여 구한 초기설계에 대한 구조물 최상층 변위는 34.07cm로서 상용 구조해석 소프트웨어로 구한 34.31cm와 유사하다. 변위설계모델에 따른 부재 종류별 변위기여도와 물량은 그림 16, 17과 같다. 재분배후 변위는 22.16cm로 감소하며 전체 구조물량은 일정하다. 기둥, 보, 가새는 물량이 증가함에 따라 변위기여도는 감소함을 알 수 있다. 보는 물량의 증가에 비해서 변위기여도의 감소가 큼을 알 수가 있으며 이는 증가된 물량이 변위에 저항하는 아웃리거 수평부재와 인방 보(lintel beam)에만 분배되었기 때문이다. 나머지 핀으로 연결된 보 부재는 물량계산에는 포함되었으나 물량재분배에서 제외되었다.

전단벽은 물량이 감소했음에도 불구하고 변위기여도가 감소한다. 이는 초기 설계시 전단벽의 두께가 효과적으로 결정되지 못했음을 나타낸다. 재분배후 변위가 허용변위를 만족하므로 변위제약을 위한 추가적인 물량의 증가는 없다. 최종 강도설계단계에서 물량은 0.3%증가하며 변위는 22.13cm로 예측되었다. 최종강도설계에 하중은 횡 하중만이 고려되었다. 검증을 위해 상용구조해석 소프트웨어로 계산한 변위는 21.08cm로서 예측 변위와는 5.0%의 오차를 보인다. 초기설계에 대한 최대 층간변위는 0.74cm로 20층에서 발생하였으나, 변위설계모델 적용 후 최대 층간변위는 0.48cm로 26층에서 발생한다.

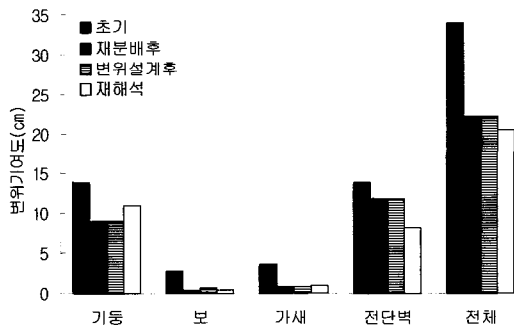


그림 16 60층 변위기여도(횡하중)

4.2.2 60층 예제 결과(횡하중과 연직하중 작용 경우)

변위설계모델을 이용하여 구한 초기 설계에 대한 구조물 최상층 변위는 횡하중의 방향에 관계없이 34.07cm로서 횡하중 만 작용하는 경우와 동일하다. 구조물 최상층 예측변위가 횡하중 만 작용하는 경우와 동일하지만 부재 변위기여도는 다르며, 또한 횡하중의 방향에 따라 부재별로 두개의 다른 변위기여도를 가진다. 앞에서 언급한 바와 같이 물량 수정계수 계산시 부재 변위기여도는 두 변위기여도 중 큰 변위기여도를 사용한다. 변위설계모델에 따른 부재 종류별 변위기여도와 물량은 그림 18, 19와 같다. 변위조절설계 모델에 따른 재분배후의 변위는 23.03cm로 감소하며, 전체 구조 물량의 증감은 없다. 기둥과 가새는 물량이 증가함에 따라 변위기여도는 감소한다. 보와 전단벽은 부재 물량의 감소에도 불구하고 변위기여도는 감소한다. 예측변위가 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가물량은 필요치 않으나, 최종 강도설계 단계에 물량은 3.6%증가하며 변위는 22.61cm로 예측되었다. 검증을 위해 상용 구조해석 소프트웨어로 구한 변위는 21.66cm로서 예측 변위와는 4.4%의 오차를 보인다. 초기설계에 대한 최대 층간변위는 0.74cm로 20층에서 발생하였으나, 변위설계모델 적용 후 최대 층간변위는 0.48cm로 26층에서 발생한다. 구조물이 횡하중을 받는 경우와 횡하중과 연직하중을 동시에 받는 경우의 변위설계모델 적용에 따른 변위와 층간변위는 그림 20, 21과 같다.

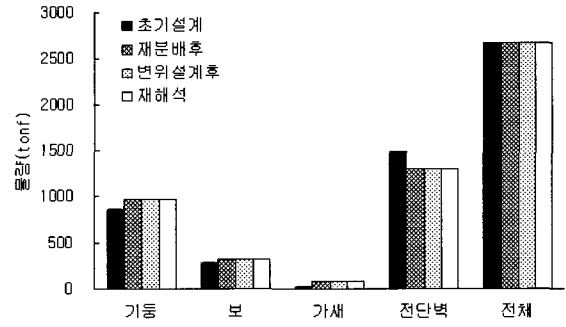


그림 17 60층 물량(횡하중)

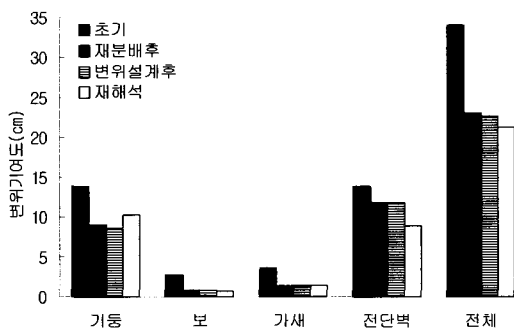


그림 18 60층 변위기여도(횡하중+연직하중)

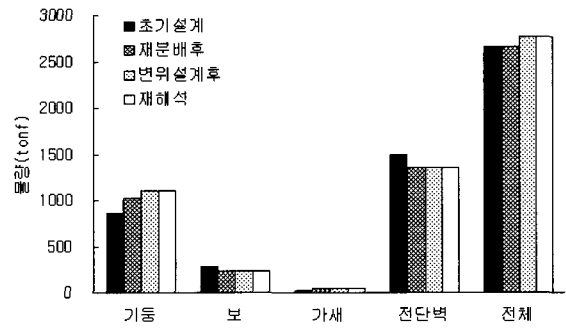


그림 19 60층 물량(횡하중+연직하중)

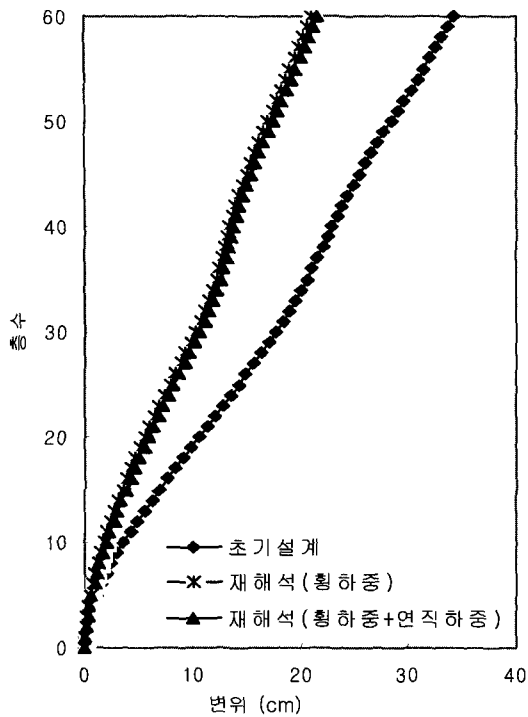


그림 20 60층 구조물의 변위

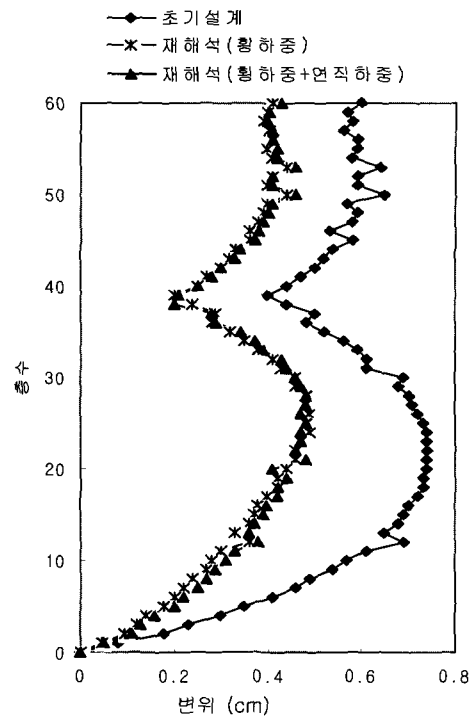


그림 21 60층 구조물의 층간변위 그림 14 20층 구조물의 층간변위

5. 결 론

고층 건물의 횡변위는 횡하중 지지시스템을 구성하는 모든 부재들의 부재변위 기여도의 합으로 계산될 수 있다. 그러므로 특정 해당 부재의 단면 성능을 직접 조절하여 부재력 별 강도조건을 만족시키는 강도설계와는 달리 특정 소수 부재 만의 단면성능을 변화시켜 변위 제한 조건을 만족 시키기는 어렵다. 이러한 이유로 최근 재분배기법을 이용한 변위조절설계기법에 대한 연구가 실용적인 기법으로 연구 개발되고 있다. 그러나 재분배기법을 이용한 변위조절설계법에서는 강도설계를 고려하지 않고 변위기여도에 근거하여 부재 성능을 재분배하므로 재분배 후 횡하중과 수직하중을 동시에 고려한 강도 재검토가 필요하게 된다.

그러므로 본 연구에서는 수평하중과 수직하중이 동시에 작용하는 경우에 대하여 재분배 기법을 정식화 하였으며 이를 20층 강접골조 전단벽 구조물과 60층 아웃리거 구조물의 변위제어에 적용하여 기존 수평하중 만을 고려한 변위제어 모델과 비교 및 평가하였다. 개발된 변위조절 모델을 고층 건물 변위설계에 적용한 결과 60층 예제의 경우 횡하중 만을 고려하는 경우에 비하여 변위는 21.08cm에서 21.66cm로 그리고 층간변위의 경우 0.48cm(26층)에서 0.48cm(26층)로 동일하거나 비슷한 성능을 보였으며 전체 구조물량이 0.3%에서 3.6%로 증가하였다. 강성설계 후 강도 재검토시 실제 구조물에 작용하는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려해야 하므로 에너지법에 근거한 재분배기법을 사용할

경우 횡하중과 연직하중을 함께 고려한 재분배기법을 사용하는 것이 타당할 것으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 산·학·연 공동연구개발사업 (과제번호: C102A1000004-02A0200-00410)의 일부로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Baker, W. F., "Sizing techniques for lateral systems in multi-story steel buildings", 4th World Congress on Tall Buildings: 2000 and Beyond, CTBUH, Hong Kong, 1990, pp.857~868
2. Charney, F.A. "The use of displacement participation factors in the optimization of drift controlled buildings", Proceedings of 2nd conference on Tall Buildings in Seismic Regions, 55th Regional Conference, Los Angeles, CA, 1991
3. Wada, A. 1991. "Drift control method for structural design of tall buildings", Proceedings of 2nd Conference on Tall buildings in Seismic Regions, 55th Regional Conference, Los Angeles, CA.

4. Chan, C. M., and Grierson, D. E., "An efficient resizing techniques for the design of tall buildings subject to multiple drift constraints", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 2, No. 1, 1993, pp.17~32
5. Chan, C. M., Grierson D.E., Sherbourne A. N. "Automatic optimal design of tall steel building frameworks", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.5, 1995, pp.838~847
6. Park, H. S., and Park, C. L., "Drift control of high-rise buildings with unit load method", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 6, No. 1, 1997, pp.23~35
7. 박효선, 안선아, "재분배기법을 이용한 강구조물의 강성설계법", 한국강구조학회논문집, 제10권1호, 1998.
8. Park, H. S. and Ahn, S. A. "Resizing Methods for Drift Control of Tall Steel Structures" , *Structural Steel PSSC' 98* Vol 2. pp 1017~1022
9. 서지현, 박효선 "재분배기법을 이용한 고층 구조물의 수평변위 설계법", 대한 건축학회 논문집, 제17권 제9호, 2001, pp.3~80
10. Chan, C. M. Optimal lateral stiffness design of tall buildings of mixed steel and concrete construction. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10: pp.155~177
11. Park, H. S., Hong, K. P., and Seo. J. H., "Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 11, 2002, pp.35~49
12. Panagiotis A. Makris, Christopher G. Probatidis. Weight minimization of displacement-constrained truss structures using a strain energy criterion, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191: 2002, 2159~2177
13. 서지현, 박효선 "실용적인 철골 프레임-전단벽 시스템의 변위조절법 개발", 한국 강구조학회 학술 발표대회 논문집, 2003, pp.578~583
14. 서지현, 박효선 "부재력 특성을 고려한 변위조절 설계법", 한국전산구조공학회 학술발표논문집, 2003, pp.123~129