

부재 그룹과 하중 조합을 고려한 고층건물 변위조절 설계법

Drift Design Method of High-rise Buildings Considering Design Variable Linking Strategy and Load Combinations

서 지 현*

박 효 선†

Seo, Ji-Hyun

Park, Hyo-Seon

(논문접수일 : 2005년 8월 2일 ; 심사종료일 : 2006년 9월 28일)

요 지

재분배 기법은 민감도 해석 없이 변위에 대한 각 부재의 변위기여도를 간단하게 계산 한 후, 변위기여도에 근거하여 물량을 분배함으로써 변위를 제어할 수 있는 실용적인 고층건물 변위 설계법으로 인식되고 있다. 그러나 에너지 이론에 근거한 재분배 기법은 하중 조건에 따라서 서로 다른 변위기여도를 가질 수 있게 되며, 특히 횡력 뿐만 아니라 상당한 량의 연직하중도 함께 받고 있는 고층건물의 재분배 기법 적용시의 변위기여도 계산에는 연직하중의 영향이 고려하여야 한다. 또한, 고층 건물의 변위설계에 재분배 기법을 적용하기 위해서는 실용성을 높이기 위해서 부재 그룹핑이 고려되어야 하는데 부재 그룹핑 고려에 따른 연직하중의 영향을 다르게 나타나게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 하중의 종류와 부재 그룹핑 여부를 변수로 하여 세 가지의 재분배 알고리즘을 개발한 후, 이를 20층 강접 골조 전단벽 예제와 60층 아웃리거 예제의 변위 설계 적용하였다.

핵심용어 : 고층건물, 변위설계, 최적화, 재분배기법, 변위기여도

Abstract

Drift design methods using resizing algorithms have been presented as a practical drift design method since the resizing algorithms proposed easily find drift contribution of each member, called member displacement participation factor, to lateral drift to be designed without calculation of sensitivity coefficient or re-analysis. Weight of material to be redistributed for minimization of the lateral drift is determined according to the member displacement participation factors. However, resizing algorithms based on energy theorem must consider loading conditions because they have different displacement contribution according to different loading conditions. Furthermore, to improve practicality of resizing algorithms, structural member grouping is required in application of resizing algorithms to drift control of high-rise buildings. In this study, three resizing algorithms on considering load condition and structural member grouping are developed and applied to drift design of a 20-story steel-frame shear-wall structure and a 60-story frame shear-wall system with outriggers.

Keywords : high-rise buildings, drift design, optimization, resizing technique, design participation factor

1. 서 론

최근, 국내 및 동남아를 중심으로 고층건물의 건설이 활발해 지고 있다. 이러한 고층건물의 증가는 효율적인 토지 이용 측면 이외에 각 나라들의 경제성장의 과시 및 그 지역의 랜드마크적인 성격으로 인해 고층건물의 높이는 경쟁적으로 높아지고 있다. 고층건물 설계의 효율성을 정확하게 평가하

기는 힘들지만, 구조적인 측면에서는 단위 면적당 소요 물량으로 그 효율성을 평가하고 있다. 건물의 층수 및 높이가 높아질수록 중력하중에 의한 물량의 증가보다 바람과 지진하중에 의한 물량의 증가가 훨씬 크다. 그러므로 고층건물 설계에서는 횡하중에 대한 강성을 확보하는 것이 구조설계의 핵심기술이 되고 있다. 고층건물에서 중력하중 및 횡하중에 의해 구조 부재에 발생하는 부재력은 기존의 구조해석 상용소

* 책임저자, 정회원 · 연세대학교 건축공학과 부교수

Tel: 02-2123-2794 : Fax: 02-365-4668

E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

* 연세대학교 건축공학부 박사후과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

프트웨어를 이용하면 쉽게 알 수 있으므로, 이러한 부재력을 만족하는 부재 사이즈를 정함으로서 강도설계는 쉽게 이루어질 수 있다. 이러한 강도설계 기술은 국내외 구조사무소의 기술 수준이 동등하다고 여겨진다. 하지만 횡하중에 의해서 구조물에 발생하는 변위나 층간변위, 가속도 제어등과 관련된 강성설계는 기존 상용 소프트웨어에서는 반응조절에 대한 직접적인 정보를 얻을 수 없으므로 설계자의 경험과 직관에 의존하고 있는 실정이다. 특히, 고층건물의 구조물량과 구조 시스템을 결정짓는 중요한 요소가 되는 변위 제어 설계에 대한 정형화된 기술이 아직 개발되어 있지 못하다.

고층건물의 출현시점이 국내보다 빠른 해외에서는 강성설계에 관한 중요성을 미리 인식하여 강성설계에 관한 연구가 오래전부터 연구되어지고 있다. 특히 강성설계 요소 중 구조 시스템이나 구조물량을 결정짓는 중요한 요소인 변위조절 설계에 관해서는 30여년 전부터 최적화 기법을 이용한 연구가 진행되고 있다(박효선 등, 1998). 하지만 이러한 대부분의 최적화 기법을 이용한 변위설계법이 반복적인 구조해석이나 민감도 계산등을 요구하므로 수만, 수십 만개의 부재로 이루어지는 고층건물 부재수를 고려하면 엄청난 계산량으로 인해 실무 적용에는 한계가 있다. 또한 최적화 이론의 난이성, 최적화 알고리즘의 안정성 문제도 실무 적용을 어렵게 하는 원인이다.

1990년초부터 Baker, Finley, Wada 등에 의해 에너지 이론에 근거한 실용적인 변위조절 설계법이 소개되었다. 이러한 방법들은 에너지 이론을 이용하여 반복적 구조해석이나 민감도 해석(Sensitivity Analysis)없이 횡 변위에 비교적 영향이 많은 부재(Active Member)를 선택하여 단면 성능을 수정함으로써 횡변위를 제어하였다. 그 후 Chan, Grierson, Sherbourne(1995)는 고층 철골 구조물의 자동 재분배기법을 제안하였으며, 현재 동하중에 대한 변위제어기법에 대한 연구가 진행 중이다. Baker와 Chan에 의해 개발된 변위조절 설계법은 S.O.M.이나 O.A.P.와 같은 일부 외국 엔지니어링 회사에서 고층건물 변위조절 설계에 실재 적용되고 있다. 국내에서는 Park과 Park(1997)에 의해 단위하중법을 이용한 횡하중을 받는 고층건물의 변위설계법이 제안되었으며, Park과 Ahn(1998)은 철골 고층구조물의 변위 제어를 위한 단면적과 단면 이차모멘트를 설계 변수로 하는 재분배 알고리즘을 제안하였다. 또한 Park과 Seo(2002)는 강접-폴조 전단벽 구조물의 변위 제어를 위한 알고리즘을 제안하였다.

재분배 기법을 이용한 변위조절 설계법은 에너지 이론에 근거하여 횡 변위에 대한 부재별 변위기여도를 간단한 계산을 통하여 구하고 이를 구조최적화 문제로 정식화하여 반복적 구조해석이나 민감도 계산없이 변위를 최소화하기 위한 분배물량을 정량적으로 구해주는 실용적인 변위조절기법이

다. 대부분의 고층건물 설계법은 변위조절 설계시 횡하중만을 고려하고 있으며, 이제까지 개발된 재분배 기법을 이용한 변위 설계법(박효선 등, 1998;1999;2001;2002; Park 등, 1997;1998;2002) 또한 횡력에 의해 부재에 축적되는 에너지만을 이용하여 변위기여도를 계산하였다. 하지만, 실제 고층 건물은 횡력 뿐만 아니라 상당한 크기의 중력하중도 함께 받고 있다. 그러므로 재분배 기법을 이용한 고층건물의 변위 설계시 횡력과 중력에 의해 축적되는 에너지를 함께 고려하여 변위기여도를 계산할 필요가 있다.

본 연구에서는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려하여 변위 기여도를 계산하는 변위 설계법을 개발하여 선행 연구된 횡하중 만을 고려하여 변위기여도를 계산하는 변위 설계법(박효선 등, 1998;1999;2001;2002; Park 등, 1997;1998;2002)과 비교하였다. 또한 건물 설계시 시공 및 설계의 편의성을 위해 구조 거동 및 위치에 따라 비슷한 특성을 가지는 부재는 같은 단면을 가지도록 부재 그룹핑(Design Variable Linking Strategy)이 적용되고 있다. 부재 그룹핑을 고려할 경우에는 연직하중의 영향이 부재그룹핑을 고려하지 않을 경우와 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 횡하중 만을 고려한 경우, 횡하중과 연직하중을 함께 고려한 경우, 횡하중과 연직하중을 고려하며 동시에 부재 그룹핑을 고려한 경우에 대한 고층 건물 변위조절 설계 알고리즘을 표 1과 같이 각각 알고리즘 I, II, III로 정의하고, 이를 20층 프레임-전단벽 구조물과 60층 전단벽-아웃리저 구조물의 변위조절설계에 적용하여 개발된 변위조절 설계법의 적용성 및 효율성을 검토하였다. 횡하중과 연직하중을 함께 고려할 경우, 변위기여도를 구하기 위한 적분 모듈이 필요하다. 횡하중과 연직하중을 고려한 변위기여도 계산 적분 모듈은 참고문헌(서지현 등, 2004)에 자세히 나타나 있다.

2. 변위조절 설계법을 위한 정식화

본 연구에서 제안하는 변위조절 설계법은 재분배기법을 이용한다. 재분배기법은 에너지 이론을 이용하여 부재별 변위 기여도를 계산하고 이를 구조최적화를 통해 물량을 재분배함으로써 변위를 제어하는 방법이다. 먼저, 단위 하중법을 이용하여 각 부재들의 변위기여도는 실재하중에 의한 부재력과 단위하중에 의한 부재력을 이용하여 식 (1)과 같이 구해진다. 제어하고자 하는 구조물 최상층의 변위는 단위하중이 주어진 지점의 변위로서 모든 부재들의 변위기여도의 합으로 구해진다.

$$\delta = \sum_{k=1}^m \delta_k = \sum_{k=1}^m \left\{ \int_0^l \frac{N_k^L N_k^U}{EA_k} dx + \alpha \int_0^l \frac{V_k^L V_k^U}{GA_k} dx + \int_0^l \frac{M_k^L M_k^U}{EI_k} dx \right\} \quad (1)$$

여기서, δ 와 δ_k 는 제어되어야 할 변위와 k 번째 부재의 변위기여도를 나타낸다. N_k, V_k, M_k 는 실재하중과 단위 하중에 의해서 부재력을 나타내며 각각 상첨자 L, U 로 구분된다. E, G 는 탄성계수와 전단탄성계수를 나타내며 A_k, I_k 는 k 번째 부재의 단면적, 단면 2차모멘트를 나타낸다. 부재별 변위 기여도는 최상층 변위를 효율적으로 제어하기 위한 정보를 제공하므로 구해진 변위기여도를 변위제어 문제로 치환하기 위한 구조정식화가 필요하다. 본 논문에서 구조정식화는 부재 그룹핑을 고려하지 않는 경우와 부재 그룹핑을 고려한 경우로 구분하였다.

2.1 정식화 I(부재 그룹핑 고려안함)

정식화 I은 부재 그룹핑을 고려하지 않는 변위조절 설계를 위한 정식화이다. 단위 하중법에 구해진 최상층 변위 δ 는 철골 부재와 철근콘크리트 부재의 변위기여도 합이며, 변위기여도는 물량에 반비례한다는 가정 하에 목적함수는 식 (2)와 같이 정의한다. 변위기여도가 물량에 반비례 한다는 가정은 식 (1)에 설명될 수 있다. 변위기여도를 부재력 성분별로 분석해보면, 축력 성분과 전단력 성분은 물량과 직접적으로 관련 있는 단면적에 선형 반비례함을 알 수 있으나, 모멘트 성분의 변위기여도는 단면 2차 모멘트와는 선형 반비례 관계가 성립하지만 설계변수인 단면적과 단면 2차 모멘트는 일반적으로 비선형관계가 성립하므로, 부재별 변위기여도는 물량과 정확한 선형반비례 관계가 성립하지는 않는다. 물량과 변위기여도가 완전한 선형 반비례관계는 아니지만 본 연구에서는 알고리즘의 단순화를 위해 물량과 직접관련이 있는 단면적만을 설계 변수로 사용하여 물량과 변위기여도는 반비례하는 것으로 가정하였다. 제약함수는 재분배 전후 물량의 변화가 없는 것으로서 식 (3)과 같이 정의한다. 식 (4)는 물량 재분배후 철근 콘크리트 부재 물량에 제한을 둠으로서 시공 과정에서 발생할 수 있는 문제를 고려한 경계부 제약조건 (Side Constraints)이다.

$$\text{minimize } \delta_i = \sum_{k=1}^{m_s} \frac{\delta_k}{\beta_i} + \sum_{k=1}^{m_c} \frac{\delta_k}{\beta_j} \quad (2)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^{m_s} \beta_i W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{m_c} \beta_j W_j \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^{m_s} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{m_c} W_j$$

$$\beta_L \leq \beta_j \leq \beta_U \quad j=1, \dots, m_c \quad (4)$$

여기서 δ, β, W 는 각각 변위기여도, 물량 수정계수, 물량을 나타내며 하첨자 i, j 는 각각 철골 부재, 철근콘크리트 부재를 나타내며 m_s, m_c 는 철골 부재 수와 철근콘크리트 부재수를 나타낸다. n 은 철근콘크리트 물량을 철골물량으로 치환하기 위한 철골과 철근콘크리트의 탄성계수 비를 나타낸다. 제약 최소화 문제를 라그랑지 승수(Lagrange Multiplier)를 이용하여 무제약 최소화 문제로 치환한 후 Kuhn-Tucker 조건에 의해 $\beta_i, \beta_j, \lambda$ 에 대해서 미분하여 정리하면 물량수정계수는 식 (5), (6)과 같이 구해진다. 식 (5), (6)에서 구해진 물량 수정계수를 초기 물량에 곱함으로써 물량을 재분배 한다.

$$\beta_i = \left(\frac{\delta_i}{W_i} \right) \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2}, \quad i=1, \dots, m_s \quad (5)$$

$$\beta_j = \left(\frac{\delta_j}{W_j} \right) \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2}, \quad j=1, \dots, m_c \quad (6)$$

여기서,

$$\left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^{m_s} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{m_c} W_j \right) \times \left[\sum_{i=1}^{m_s} (\delta_i W_i)^{1/2} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{m_c} (n \delta_j W_j)^{1/2} \right]^{-1} \quad (7)$$

2.1 정식화 II(부재 그룹핑 고려)

정식화 II는 부재 그룹핑을 고려한 변위조절 설계법의 정식화로서 재분배 계수를 구하는 과정은 정식화 I과 동일하며 다만 변위기여도, 물량, 물량 수정계수 등이 그룹단위로 구해진다. 그룹별 변위기여도는 그룹내 부재들의 변위기여도의 합으로 구해진다. 식 (8), (9)의 δ'_i, δ'_j 는 i 번째 철골 그룹 변위기여도와 j 번째 철근 콘크리트 그룹 변위기여도를 나타낸다.

목적함수와 제약함수는 부재 그룹을 고려하여 식 (10), (11)과 같이 정의한다.

$$\delta'_i = \sum_{k=1}^{D_{si}} \delta_k \quad (8)$$

$$\delta'_j = \sum_{k=1}^{D_{sj}} \delta_k \quad (9)$$

$$\text{minimize } \delta_i = \sum_{i=1}^{G_s} \frac{\delta'_i}{\beta'_i} + \sum_{j=1}^{G_c} \frac{\delta'_j}{\beta'_j} \quad (10)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^{G_s} \beta'_i W'_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{G_c} \beta'_j W'_j = \sum_{i=1}^{G_s} W'_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{G_c} W'_j \quad (11)$$

$$\beta'_L \leq \beta'_j \leq \beta'_U, j=1, \dots, G_c \quad (12)$$

$$\beta'_i = \left(\frac{\delta'_i}{W'_i} \right) \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2}, i=1, \dots, G_s \quad (13)$$

$$\beta'_j = \left(\frac{\delta'_j}{W'_j} \right) \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2}, j=1, \dots, G_c \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^{G_s} W'_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{G_c} W'_j \right) \quad (15)$$

$$\times \left[\sum_{i=1}^{G_s} (\delta'_i W'_i)^{1/2} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{G_c} (n \delta'_j W'_j)^{1/2} \right]^{-1}$$

여기서 δ' , β' , W' 는 각각 그룹 변위기여도, 그룹 수정 계수, 그룹 물량을 나타내며 G_s , G_c 는 철골 그룹수와 철근 콘크리트 그룹수를 나타낸다.

정식화 I 과 동일한 과정에 의해서 그룹별 재분배 계수를 구할 수 있으며, 이를 초기 그룹물량에 곱함으로써 물량을 재분배한다.

3. 변위조절 알고리즘

본 연구에서는 변위조절 설계법을 하중의 종류와 부재 그룹핑에 따라 표 1과 같이 세 가지의 알고리즘으로 개발하였다. 알고리즘 I 은 기존 연구에서 제시한 방법으로 횡하중에 대한 부재 단위의 변위조절 알고리즘이며, 알고리즘 II 는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려한 부재 단위의 변위조절 알고리즘이며, 알고리즘 III 은 횡하중과 연직하중을 동시에 고려한 부재그룹 단위의 변위조절 알고리즘이다.

표 1에서 제안한 세 가지 알고리즘은 허용응력 설계법에 근거한 강도설계 모듈과 결합하여 그림 1과 같은 고층 구조물의 변위 설계법으로 개발되었다.

4. 예제적용

그림 1에서 제시한 변위조절 설계법을 20층 강접 골조 전단벽 구조물과 60층 아웃리저 구조물의 변위설계에 적용하였다. 횡하중은 정적 풍하중으로서 대한 건축학회기준에 따라 기본 풍속 30m/sec, 노풍도 B, 중요도 계수는 1로 가정하였다. 건물의 허용변위는 구조물 높이의 0.2%로 제한하였다.

4.1 20층 강접골조-전단벽 구조물 예제

5경간 20층 강접-골조 전단벽 구조물의 층고는 4m, 최상층 높이는 80m로서 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 부재로 구성되어 있다. 초기 모델의 구조부재는 5개 층 단위로 내·외부 부재를 구분하여 8개의 기둥 그룹과 8개의 거더 그룹 및 4개의 전단벽 그룹으로 구성하였다. 그림 2는 5경간 20층 강접 골조 전단벽 구조물의 해석 모델을 나타내며 숫자는 부재 그룹번호를 나타낸다. 1~8번 그룹은 기둥 부재그룹을 나타내며, 9~16번 그룹은 거더 그룹을 나타내며, 17~20번은 철근 콘크리트 전단벽 부재 그룹을 나타낸다. 강재는 강접으로 연결되었으며, 전단벽과 거더는 핀 접합으로 모델링하였다. 강재의 항복강도는 3,300kgf/cm², 단위 중량은 7.85×10³kgf/cm³, 탄성계수는 2.1×10⁶kgf/cm², 콘크리트 설계 기준강도는 240 kgf/cm², 탄성계수는 2.1×10⁵kgf/cm²이다. 연직하중은 7,000 kgf/m의 보에 작용하는 등분포하중으로 가정하였으며, 초기 구조모델의 부재는 초기 강도설계를 통해 강도 조건의 만족하는 부재로 선택하였다.

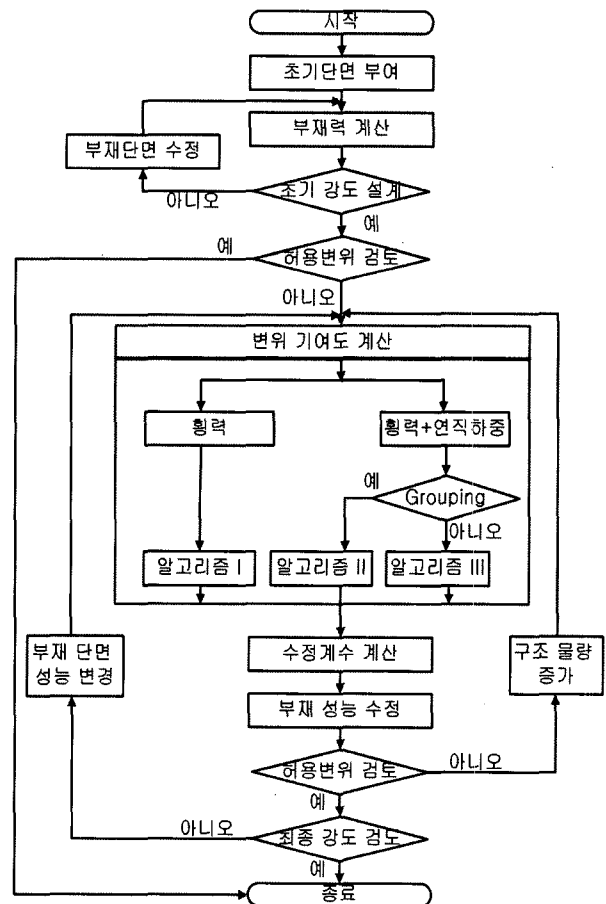


그림 1 고층 건물의 변위 조절 순서도

표 1 재분배 기법의 3가지 알고리즘

	하중종류	정식화
알고리즘 I	횡하중	정식화 I
알고리즘 II	횡하중+연직하중	정식화 I
알고리즘 III	횡하중+연직하중	정식화 II

표 2 20층 강접 골조 전단벽 구조물 초기 설계 부재

부재종류	그룹 넘버	부재 종류	강도 (kg/cm^2)
기둥	1	H-414×405×18×28	3300
	2	H-428×407×20×35	
	3	H-400×408×21×21	
	4	H-414×405×18×28	
	5	H-388×402×15×15	
	6	H-400×400×13×21	
	7	H-300×300×10×15	
	8	H-300×300×10×15	
거더	9~16	H-390×300×10×16	
전단벽	17~18	30cm	240
	19~20	20cm	

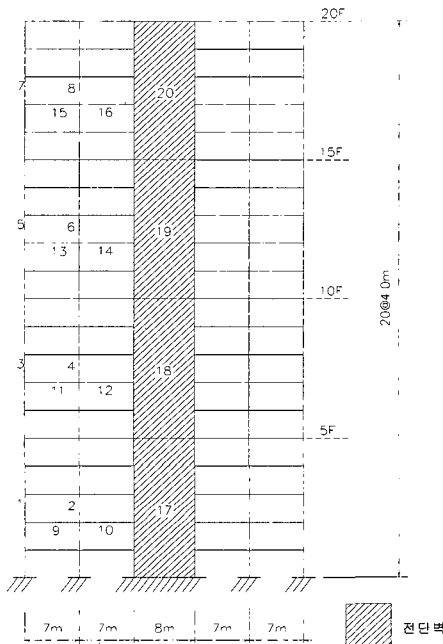


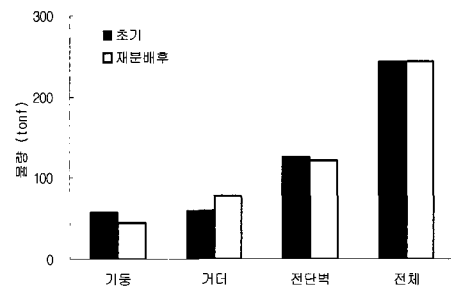
그림 2 5경간 20층 강접-골조 전단벽 구조물

4.1.1 알고리즘 I 적용 결과(20층 예제)

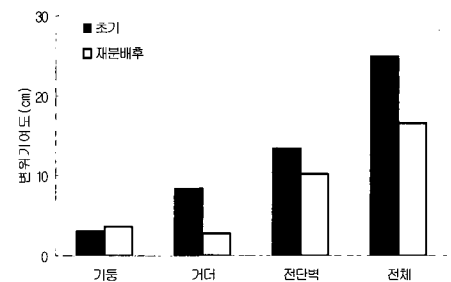
단위 하중법으로 구한 구조물 최상층 변위는 24.93cm로서 건물 높이의 0.31%이며, 상용프로그램에서 구해진 23.58cm와는 5.4%의 차이를 보인다. 그림 3은 재분배 전·후 변위 기여도와 물량의 변화를 나타낸다. 식 (5), (6)에 의해서 구

해진 수정계수를 초기 물량에 곱하여 물량을 재분배한다. 물량 재분배에 따라 거더는 물량이 증가하면서 변위 기여도는 감소한다. 특히, 거더는 물량의 증가에 따른 휨 성능 증가가 크므로 변위기여도 감소 효과가 크게 나타난다. 기둥은 재분배 후 물량이 감소하면서 변위 기여도가 증가한다. 거더와 기둥의 변위기여도 및 물량 변화는 물량과 변위기여도는 반비례라는 가정을 잘 나타낸다. 하지만 전단벽은 재분배 후 물량이 다소 감소하지만 변위기여도는 오히려 감소하는데, 이는 전체 물량이 다소 감소하더라도 각 부재들의 물량은 효율적으로 분배됨으로 변위기여도는 감소하게 된다. 재분배 후 예측 변위는 16.58cm로서 구조물 높이의 0.21%로 감소한다.

물량 재분배 후 예측 변위는 부재력은 일정하다는 가정하에 초기 해석 부재력을 사용하므로 구조 재해석은 필요치 않다. 부정정 구조물은 단면 성능이 바뀔에 따라 부재력이 바뀌지만 부재력은 주로 외부하중과 구조형상 및 부재 위치에 의해서 결정되므로 단면 성능 변화에 따른 부재력의 변화는 크지 않다. 그러므로 재분배 후 변위예측 시 부재력은 일정한 것으로 가정하여 초기 해석 부재력을 사용한다. 이러한 가정은 일반 구조설계에서도 부재력을 만족하지 못하는 부재가 있을 경우 부재력을 만족하는 단면을 선택하고 다시 해석하지 않는 것과 같은 경우이다. 재분배 후 예측 변위가 허용 변위인 구조물 높이의 0.2%를 초과하므로 그림 1의 순서도에 따라 구조 물량을 증가시키고 증가된 물량은 변위 기여도에 따라 각 부재로 분배되어 진다. 물량 증가와 분배의 과정



(a) 물량의 변화



(b) 변위기여도의 변화

그림 3 알고리즘 I 적용 결과

은 허용 변위를 만족할 때까지 반복되어 제어를 위해 물량증가는 2.5%이다. 변위제어 후 강도설계단계에서 물량 증가는 없으며, 최종 횡 방향 변위는 16.0cm로서 건물 높이의 0.2%로 감소하였다. 수정된 물량을 이용하여 상용해석 프로그램으로 재해석한 결과, 변위는 12.95cm로 건물 높이의 0.16%로 감소하였고 단위하중법에 의한 변위 13.24cm와는 2.2%의 오차를 보인다. 최대 층간 변위는 초기 해석시 1.50cm에서 알고리즘 I 적용에 따라 0.84cm로 감소한다.

4.1.2 알고리즘 II 적용 결과(20층 예제)

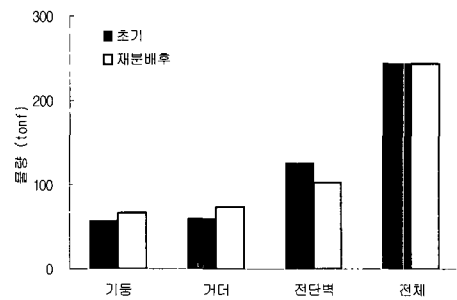
단위하중법에 의한 변위는 24.93cm로서 알고리즘 I 과 동일하지만 횡하중과 연직하중을 고려함에 따라 부재들의 변위기여도가 달라진다. 입면형태상 대칭인 부재는 알고리즘 I 에서는 부재력이 같으므로 같은 변위기여도를 가졌으나 알고리즘 II에서는 부재력이 다르므로 다른 변위기여도를 가지게 된다.

또한, 알고리즘 I 에서는 대칭부재의 부재력이 같으므로 하중의 양방향성을 고려해줄 필요가 없었으나 알고리즘 II 에서는 대칭 부재의 변위기여도가 다르므로 하중의 양방향성을 고려해주어야 한다.

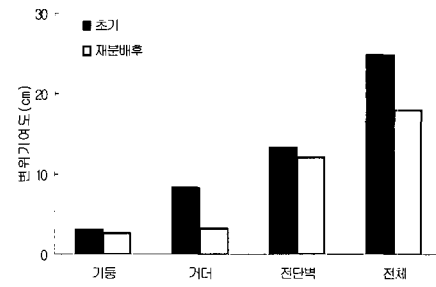
하중 양방향성은 하중이 구조물 좌표축의 양의 방향과 음의 방향으로 작용할 수 있음을 나타내는 것인데, 대칭 구조물에서 횡력만을 고려하는 경우에는 구조위치상 대칭 부재의 부재력이 동일하므로 횡하중의 방향에 따라 부재력이 바뀌지 않지만 횡하중과 연직하중을 동시에 고려한 경우에는 횡하중 작용 방향에 따라 대칭 부재의 부재력과 변위기여도가 달라진다. 그러므로 알고리즘 II에서는 하중 양방향성을 고려하여 대칭 부재의 변위기여도는 두 부재 변위기여도중 큰 값을 사용하여 수정계수를 계산하였다. 이러한 하중 양방향성에 대한 고려는 분배 계수 계산시 부재별 변위기여도를 정확하게 나타내지 못하므로 변위제어 성능을 저해 시키는 요인이 된다. 즉, 기둥은 하중의 방향에 따른 변위기여도의 차가 크며, 전단벽은 구조물의 중앙부에 위치하므로 하중의 방향에 따른 변위기여도가 동일하게 된다. 그러므로 하중의 방향별 변위기여도 중 큰 변위기여도를 고려하여 물량 분배 계수를 계산할 경우 알고리즘 I에 비해서 기둥의 물량은 증가하고 전단벽의 물량은 감소하게 된다.

그림 4에서도 재분배 물량은 알고리즘 I 과는 달리 기둥 물량은 증가하고 전단벽 물량의 감소는 더 큰 것을 나타낸다. 재분배 후 예측변위는 17.95cm로서 건물 높이의 0.22%로 감소하며 전체 구조물량은 변화 없다. 허용변위가 제한치인 건물높이의 0.2%를 초과하므로 변위제어를 위한 추가물량이 필요하다. 변위제어를 위한 증가 물량은 9.0%이며 증가된 물

량은 변위기여도에 따라 부재별로 분배된다. 변위제어 후 강도 설계단계에서 0.42%의 물량이 증가하여 전체 물량은 9.42% 증가한다. 강도설계 후 예측변위는 15.83cm로서 구조물 높이의 0.2%로 감소한다. 수정된 단면성능을 이용하여 상용프로그램으로 재해석 결과, 변위는 12.37cm로서 구조물 높이의 0.15%로 감소하며 단위 하중법에 의해 구한 변위 12.68cm와는 2.4%의 오차를 보인다. 최대 층간 변위는 1.50cm에서 알고리즘 II 적용에 따라 0.82cm로 감소한다.



(a) 물량의 변화



(b) 변위기여도의 변화

그림 4 알고리즘 II 적용 결과

4.1.3 알고리즘 III 적용 결과(20층 예제)

단위하중법에 의한 초기 예측 변위는 알고리즘 I, II와 동일하다. 식 (14), (15)에 의해 구해진 그룹별 물량수정계수를 초기 그룹물량에 곱해서 물량을 재분배하면, 재분배 후 예측변위는 16.61cm로서 구조물 높이의 0.21%로 감소한다. 일반적인 강접-골조 전단벽 시스템은 프레임과 전단벽 사이의 상호 작용(inter-action)을 이용한 가장 널리 사용되는 횡력 저항 시스템의 하나이다. 프레임과 전단벽의 상호작용은 하부에서는 전단벽, 상부에서는 골조에 의해서 구속되어지는 특성을 가지며 그룹 수정계수는 이러한 시스템 거동 특성을 잘 나타낸다. 그림 6은 변위 제어 전·후의 그룹별 물량을 나타낸다. 그룹별 물량을 살펴보면 6, 8번 그룹(기둥부재그룹)과 11, 12, 13, 14, 16번 그룹(거더부재그룹) 및

17, 18번 그룹(전단벽그룹)의 물량은 증가하게 된다. 즉, 구조물 하부에서는 주로 전단벽의 물량이 증가하며 구조물 상부에서는 골조의 물량이 증가하는 경향을 보인다. 즉, 상부에서는 주로 프레임의 강성에 의해서 횡력에 저항하므로 프레임의 물량이 증가하고 하부에서는 전단벽의 강성에 의해서 횡력에 저항하므로 전단벽의 물량이 증가한다. 재분배 후 예측 변위가 허용변위를 초과하므로 변위 제어를 위해 3.1%의 물량이 증가하며, 변위 제어 후 예측변위는 15.99cm로서 구조물 높이의 0.2%로 감소한다. 변위제어 후 강도 설계 과정에서 2, 4번 그룹내 일부 부재가 강도조건을 만족시키지 못하므로 물량이 증가한다. 강도조건을 만족하지 못하는 부재는 소수이지만 부재 그룹핑의 개념이 적용되어 그룹내의 모든 부재가 동일하게 물량이 증가하여 전체 물량은 3.5% 증가한다. 최종 예측 변위는 15.65cm로서 구조물 높이의 0.19%로 감소하며 물량은 6.46% 증가한다. 수정된 단면성능을 이용하여 상용 구조해석 프로그램으로 해석한 결과, 변위는 14.53cm로서 구조물 높이의 0.18%로 감소하며 단위 하중범으로 구한 15.16cm와는 4.2%의 오차를 보인다. 최대 층간 변위는 1.50cm에서 알고리즘 III 적용에 따라 0.89cm로 감소한다.

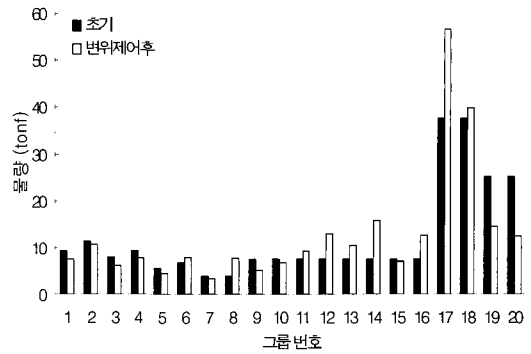
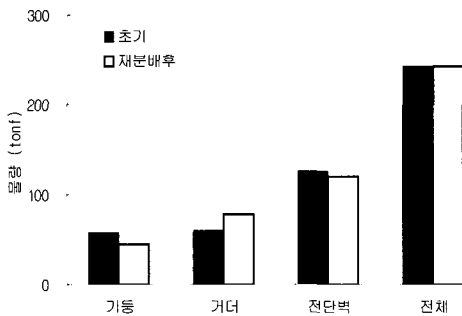


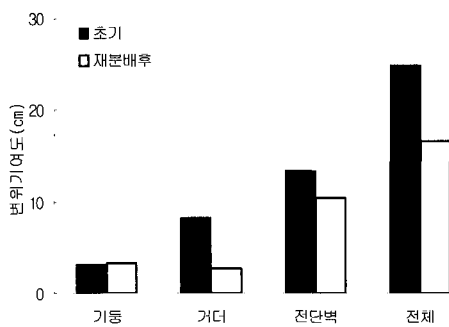
그림 6 Alt III 적용에 따른 그룹 물량

표 3 최종결과

	변위 (cm)	최대층간변위 (cm)	물량 (tonf)
초기	23.58	1.50	243.13
알고리즘 I	12.95	0.84	249.21
알고리즘 II	12.37	0.82	266.04
알고리즘 III	14.53	0.89	258.83



(a) 물량의 변화



(b) 변위기여도의 변화

그림 5 Alt III 적용 결과

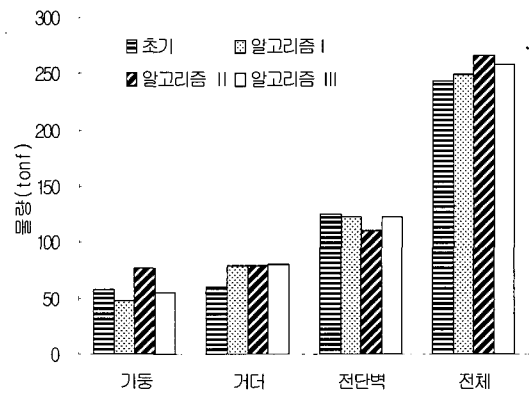


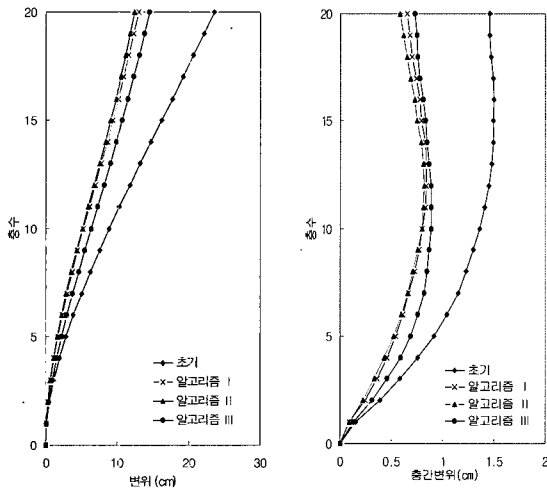
그림 7 최종 물량

4.1.4 결과 비교(20층 예제)

단위 하중범으로 구한 최상층 변위는 세 가지 알고리즘에서 동일하다. 하지만 연직하중 고려여부에 따라 부재별 변위 기여도는 다르다. 구조 형태상 대칭 부재에 대해 알고리즘 I은 대칭 부재의 변위기여도가 동일하지만 알고리즘 II는 대칭부재의 부재력도 다르고 또한 재분배계수 계산시 하중의 양방향성을 고려하므로 재분배후 결과가 알고리즘 I과는 다르다. 알고리즘 III는 알고리즘 II와 마찬가지로 횡하중과 연직하중을 동시에 고려하고 있으나 대칭 부재가 같은 그룹에 속하므로 하중 양방향성에 따른 영향이 없어지므로 알고리즘 II보다 재분배 후 변위 감소효과가 큰 것으로 분석된다. 물량의 증가는 알고리즘 I은 변위 제어 단계에서 2.5% 증가하며, 알고리즘 II는 변위제어 단계에서 9.0%, 강도설계에서 0.4%

증가하며, 알고리즘 III는 변위제어 단계에서 3.1%, 강도설계단계에서 3.4% 증가한다.

표 3과 그림 7 및 그림 8은 알고리즘 적용 후 결과를 나타낸다. 변위 조절설계 후 변위는 허용변위를 모두 만족하였고 층간변위도 감소하였다. 알고리즘 I, II, III 적용에 따라 물량은 각각 2.5, 9.42, 6.46%증가하였으며, 변위는 각각 초기 변위의 54.92, 52.46, 61.62%로 감소하며, 최대 층간 변위는 각각 56.00, 54.67, 59.33% 수준으로 감소한다.



(a) 최종 변위 (b) 층간변위
 그림 8 20층 강접 골조 전단벽 구조물 최종 결과

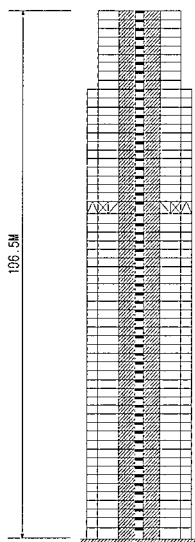


그림 9 60층 아웃리거 구조물

4.2 60층 아웃리거 구조물 예제

본 예제는 60층 아웃리거 구조물로서 철근콘크리트 전단벽과 철골 프레임 및 38층의 아웃리거 트러스로 구성되어있

다. 구조물 전체 높이는 196.5m이며, 층고는 기준층, 설비층, 하부 2개 층이 각각 3.2, 4.5, 4.2m이며, 구조물의 밑면 폭은 42.6m로서 세장비는 4.61이다. 아웃리거는 전단벽에 캔틸레버로 연결되어 있으며, 거더와 기둥은 핀 접합되어 보의 연직하중으로 인해 발생하는 모멘트를 기둥이 부담하지 않도록 설계되었다. 강제 항복강도는 3,300kgf/cm², 탄성계수는 2.1×10⁶kgf/cm², 콘크리트 강도는 400kgf/cm², 탄성계수는 2.4×10⁵kgf/cm²이다. 연직하중은 고정하중만을 고려하여 4,200kgf/m의 등분포하중으로 가정하였다. 그림 9는 60층 아웃리거 구조물의 단면도이다.

4.2.1 알고리즘 I 적용 결과(60층 예제)

단위하중법에 의해 구한 구조물 최상층 변위는 34.07cm로서 상용프로그램에서 구해진 34.31cm와는 0.7%의 오차를 보인다. 재분배 후 기둥, 거더, 가새의 물량은 증가하고 전단벽 물량은 감소한다. 대부분의 거더는 기둥과 핀 접합되어 연직하중만을 받도록 모델링 되었으므로 핀 접합된 거더 부재는 횡변위에 대한 저항능력이 없으므로 변위기여도도 없고 재분배 과정에서 제외되었다. 그러므로 거더 변위기여도는 아웃리거 상·하현제와 lintel 거더 변위기여도의 합이며 물량분배도 아웃리거 상·하현제와 lintel 거더를 대상으로 한다. 재분배 후 거더는 물량이 증가하여 변위기여도가 감소되며, 가새는 물량 증가율이 크기 때문에 변위 기여도의 감소도 크다. 재분배 후 전단벽의 전체 물량은 감소하지만 재분배시 물량이 효율적으로 분배됨으로서 변위기여도는 감소한다. 재분배 후 변위는 23.68cm로서 초기변위의 70%로 감소하며 물량 증가는 없다. 변위제어 후 최종강도 설계단계에서 0.03%의 물량이 증가한다. 수정된 단면성능을 이용하여 상용 구조해석 프로그램으로 재해석한 결과 변위는 22.34cm이며 단위하중법에 의한 21.85cm와는 2.2%의 오차를 보인다. 최대 층간 변위는 초기 해석시 0.74cm 에서 알고리즘 I 적용에 따라 0.52cm로 감소하였다.

4.2.2 알고리즘 II 적용 결과(60층 예제)

단위하중법에 의한 구조물 최상층 변위는 알고리즘 I과 동일하다. 재분배 후 기둥, 가새 물량은 증가하고 거더, 전단벽 물량은 감소하였다. 알고리즘 II는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려함으로 대칭 부재의 변위기여도가 다르므로 하중의 양방향성을 고려하여 재분배 계수를 구하게 된다. 기둥은 하중의 양방향성 고려에 따른 대칭 부재의 변위기여도중 큰 변위기여도를 이용하여 수정계수를 구하지만, lintel 거더는 구조물 입면 중앙에 위치하므로 하중 양방향성 고려 영향이 전혀 없고

아웃리저 상하현재만 하중 양방향성의 영향을 받는다. 그러므로 재분배 계수 계산시 거더의 변위기여도가 상대적으로 낮게 평가되게 된다. 재분배 후의 변위는 25.74cm로 초기 변위의 76%로 감소한다. 재분배 후 강도 설계단계에서 물량은 3.8%증가하며 변위는 25.26cm로서 초기 변위의 74%로 감소한다. 수정된 물량을 이용하여 상용 구조해석 프로그램으로 재해석한 결과 변위는 23.91cm로서 초기 변위의 70%로 감소하였으며, 단위하중법으로 구한 변위 23.64cm와는 1.1%의 오차를 보인다. 최대 층간 변위는 초기 해석시 0.74cm에서 알고리즘 II 적용에 따라 0.54cm로 감소하였다.

4.2.3 알고리즘 III 적용 결과(60층 예제)

단위하중법에 의한 최상층 변위는 알고리즘 I, II와 동일하다. 재분배 후 기둥, 거더, 가새의 물량은 증가하고 전단벽 물량은 감소한다. 본 예제는 실제 건설을 위한 구조설계된 것이지만, 초기 부재 그룹핑이 횡력에 효율적인 그룹핑임을 보장할 수 없으므로 초기 부재 그룹핑을 따를 경우 변위조절 설계를 성능을 감소시킬 가능성이 있다. 그러므로 알고리즘 III에서는 물량 재분배시 초기 부재 그룹핑을 따르지 않고, 3개 층을 기본단위로 부재 그룹을 형성하였다. 초기설계의 부재 그룹과 일치하지 않음으로 인해 재분배 후 물량은 6.6%증가하며, 예측변위는 21.64cm로서 초기변위의 64%로 감소한다. 최종 강도설계단계에서 물량은 1.4%증가하여 최종 물량은 8%증가하며, 변위는 21.60cm로서 초기 변위의 63%로 감소한다. 수정된 물량을 이용하여 상용 구조해석 프로그램으로 재해석한 결과 변위는 20.18cm로서 초기 변위의 59%로 감소하며, 단위하중법에 의해 구한 변위와 일치한다. 최대 층간 변위는 초기 해석시 0.74cm에서 알고리즘 III 적용에 따라 0.45cm로 감소하였다.

4.2.4 결과 비교 (60층 예제)

표 4는 60층 아웃리저 구조물의 변위 설계후 최종결과이다. 알고리즘 I, II, III 적용 후 변위는 각각 22.34, 23.91, 20.18 cm로서 초기 변위의 65.11, 69.68, 58.82%로 감소하였으며, 물량은 각각 0.03, 3.85, 7.97% 증가하였으며, 최대 층간변위는 각각 70.27, 72.97, 60.81%로 감소하였다.

그림 10는 60층 아웃리저 구조물의 변위설계 후 최종 물량을 나타낸다. 그림 10는 60층 아웃리저 구조물의 변위설계 후 변위와 층간변위의 변화를 나타낸다. 그림 11의 변위 및 층간 변위의 양상을 보면 재분배 알고리즘 적용후의 변위 및 층간 변위는 초기 설계안과 비슷한 형상을 가지며 감소한

것을 알 수 있다. 이것은 재분배 알고리즘이 결정된 구조시스템에서 변위를 최소화하기 위한 최적의 부재 사이즈를 결정하는 방법이므로, 재분배 알고리즘의 적용 후에는 구조물 강성이 증가로 인해 변위와 층간 변위는 초기와 비슷한 양상으로 감소하게 된다.

표 4 60층 아웃리저 구조물 최종결과

	변위 (cm)	최대층간변위 (cm)	물량 (tonf)
초기	34.31	0.74	2668.20
알고리즘 I	22.34	0.52	2668.99
알고리즘 II	23.91	0.54	2770.90
알고리즘 III	20.18	0.45	2880.77

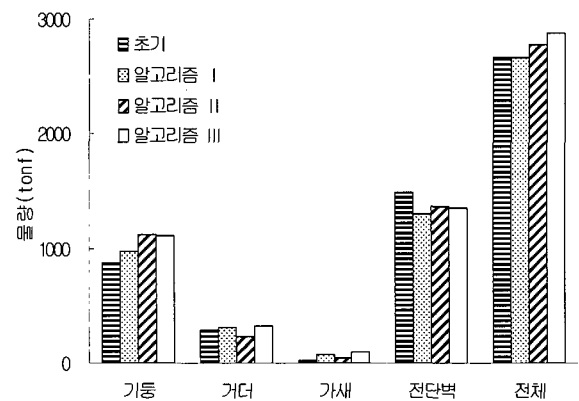
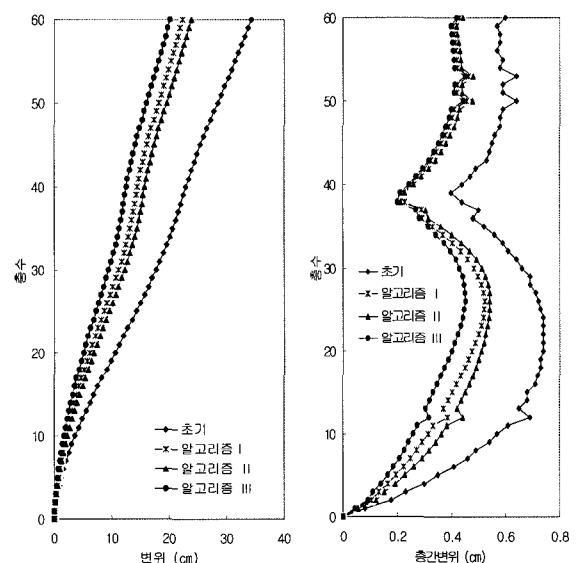


그림 10 60층 아웃리저 구조물 최종 물량



(a) 변위 (b) 층간 변위

그림 11 60층 아웃리저 구조물 최종 결과

5. 결 론

본 논문에서 제시한 변위조절 설계법은 반복적인 구조해석이나 민감도 계산없이 고층건물의 변위를 효율적으로 제어하기 위한 실용적인 방법으로서, 횡하중만 고려한 경우, 횡하중과 연직하중을 함께 고려한 경우 및 부재 그룹핑 여부에 따라 세 가지의 변위 조절 알고리즘을 제안하고 이를 20층 강접-골조 전단벽 구조물과 60층 아웃리거 구조물의 변위설계에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개발된 변위조절 알고리즘을 20층 강접-골조 전단벽 구조물의 변위 조절설계에 적용한 결과 알고리즘 I, II, III에 대해서 각각 변위는 초기 변위의 54.92, 52.46, 61.62%로 감소하였으며, 물량은 2.5, 9.42, 6.46% 증가하였으며, 최대 층간 변위는 56.00, 54.67, 59.33% 수준으로 감소하였다.
- 2) 60층 아웃리거 구조물의 변위 설계에 적용한 결과 알고리즘 I, II, III에 대해서 각각 변위는 초기 변위의 65.11, 69.69, 58.82%로 감소하였으며, 물량은 0.03, 3.85, 7.97% 증가하였으며, 최대 층간 변위는 70.27, 72.97, 60.81% 수준으로 감소하였다.
- 3) 알고리즘 II는 횡하중과 연직하중을 동시에 받고 있는 경우이므로 구조 위치상 대칭 부재의 하중 양방향성을 고려해야 한다. 하중의 양방향성을 고려할 경우 물량 분배 계수 계산시 부재 변위기여도를 정확하게 반영하지 못하므로 재분배 후 변위조절 효과가 감소함을 알 수 있다.
- 4) 부재 그룹핑을 고려한 알고리즘 III는 횡하중과 연직하중을 동시에 고려하나 대칭 부재는 같은 부재 그룹에 속하므로 하중 방향성에 대한 고려가 영향을 미치지 못하므로 재분배 후 변위조절 효과는 알고리즘 II보다는 오히려 우수하다. 하지만, 알고리즘 III는 부재 그룹핑의 개념이 적용되므로 최종 강도설계 단계에서 물량의 증가량이 부재 그룹핑을 고려하지 않을 때 보다 더 커질 수 있다.
- 5) 이상과 같은 결과에서 알고리즘 I, II, III는 고층건물 변위조절 설계에 효과적으로 적용할 수 있었으며, 변위 제어 성능은 알고리즘 I이 가장 우수하였다. 하지만, 에너지 이론에 근거한 변위조절 설계법 적용시 실제 구조물의 하중 상태와 같이 횡하중과 연직하중을 동시에 고려해줄 필요가 있으며, 또한 시공 및 설계의 효율성을 위해서 부재 그룹핑을 고려해 줄 필요가 있다. 그러므로 고층 건물의 변위설계시 알고리즘 III를 사용하는 것이 가장 타당할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 대한건축학회(2000) 건축물 하중기준 및 해석, 태림문화사, 서울, p.345.
- 박효선, 서지현(1999) 강접 골조-전단벽 구조물의 수평 변위 제어를 위한 재분배기법의 정식화, 대한 건축학회 춘계발표 논문집, 19(2), pp.277~282.
- 박효선, 서지현(2000) 횡하중과 수직하중을 받는 고층 구조물의 변위설계법, 대한 건축학회 춘계발표 논문집, 20(1), pp.87~90.
- 박효선, 서지현(2001) 재분배기법을 이용한 고층 구조물의 수평변위 설계법, 대한 건축학회 논문집, 17(9), pp.73~80.
- 박효선, 서지현(2002) 하중 종류와 부재 그룹핑을 고려한 횡 변위 제어기법, 한국 강구조학회 학술발표대회 논문집, pp.452~457.
- 박효선, 서지현(2004) 프레임-전단벽 구조물의 동적 변위조절 설계법 개발에 관한 기초연구, 한국강구조학회발표논문집, 15(1), pp.306~313.
- 박효선, 서지현(2004) 횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위 설계를 위한 재분배기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.49~58.
- 박효선, 서지현(2005) 중량 조절계수를 이용한 고층 건물 변위설계법 개발, 한국강구조공학회논문집, 17(3), pp.285~294.
- 박효선, 안선아(1998) 횡하중을 받는 평면프레임 구조물의 강성설계법, 대한건축학회 춘계발표 논문집, 18(1), pp.641~646.
- 한국강구조공학회(2003) 허용응력설계법에 의한 강구조설계 기준, 구미서관, 서울.
- Ahn, S. A., Park, H. S.(1998) Resizing Methods for Drift Control of Tall Steel Structures, *Structural Steel PSSC '98*, 2. pp.1017~1022.
- Baker, W. F.(1990) Sizing techniques for lateral systems in multi-story steel buildings, *4th World Congress on Tall Buildings: 2000 and Beyond*, CTBUH, Hong Kong, pp.857~868.
- Chan, C. M., Grierson, D. E.(1993) An efficient resizing techniques for the design of tall buildings subject to multiple drift constraints, *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(1), pp.17~32.

- Choi, C. K., Kwak, H. G., Lee, H. W.(1998) The Optimum Structural Design with Discrete Section, *Proceedings of Korea-Japan Joint Seminar on Emergin Technologes In Structural Engineering and Mechanics*, Nov. Seoul, Korea. pp.23~26.
- Cohn, M. Z, Dinovitzer, A. S.(1994) Application of Structural Optimization, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 120(2), pp.617~650.
- Hong, K. P., Park, H. S., Seo, J.(2002) H., Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 11, pp.35~49.
- Park, H. S., Park, C. L.(1997) Drift control of high-rise buildings with unit load method, *The Structural Design of Tall Buildings*, 6(1), pp.23~35.
- Taranath, B. S.(1997) Steel Concrete & Composite Design of Tall Buildings, *McGraw-Hill*, USA, p.998.