

# 중량 조절계수를 이용한 고층 건물 변위설계법 개발

## Development of the Drift Design Method of High-rise Buildings using Weight Control Factors

박 효 선<sup>1)</sup> · 서 지 현<sup>2)</sup>

Park, Hyo Seon Seo, Ji Hyun

요 약 : 고층 건물 변위설계는 고층건물 설계의 핵심 기술 중의 하나이며, 재분배 기법은 실용적인 고층건물 변위설계법으로 인식되고 있다. 재분배 기법은 구조 물량을 재분배함으로써 전체 구조물량의 변화없이 제어하고자 하는 변위를 최소화시키는 방법으로서, 재분배기법 적용에 의해서 최종 얻어지는 물량은 초기 물량의 영향을 받게 된다. 초기 물량이 과다한 모델의 경우, 재분배 기법을 적용하면 허용 변위는 충분히 만족하지만 물량 측면에서는 그 만큼의 절감 여지를 내포하고 있다고 볼 수 있다. 그러므로 중량 조절계수를 구조정식화에 포함시켜서 변위설계시 초기 설계안의 물량에 영향을 받지 않는 고층건물 변위설계 기법을 개발하였다. 제안된 변위설계법을 프레임-전단벽 구조물의 변위설계에 적용하여 그 결과를 분석한 결과, 제안된 방법은 초기 물량의 영향을 받지 않으며 고층건물 변위설계가 가능하였다.

ABSTRACT : Drift design is one of the core techniques in the structural design of high-rise buildings and resizing technique is regarded as a practical drift design method for high-rise buildings. In the resizing technique, the structural weight is re-distributed to minimize the target displacement without a change in structural weights. However, the structural weight determined from resizing algorithm is bound to the structural weight based on the preliminary design. Therefore, in this paper, a drift design method that can control the weight of the structure without causing drift control performance to deteriorate is proposed by incorporating the weight control factor in the formulation of resizing algorithm. The proposed drift design method is applied to the drift design of two frame-shear wall systems. The proposed drift design method, in this study, makes it possible to control both the drift and weight of a high-rise building.

핵심용어 : 재분배 기법, 변위설계, 고층 건물, 구조 최적화, 중량 조절계수

KEYWORDS : resizing technique, drift design, high-rise buildings, structural optimization, weight control factors

### 1. 서론

고층건물의 구조설계는 설계 대상 구조반응(응력, 변위 등)을 기준으로 강도설계와 강성설계로 나눌 수 있다. 하중의 작용에 의하여 부재 내에 발생하는 부재력의 크기를 조절하는 강도설계는 구조해석 결과를 이용하여 설계 대상 부재의 단면 성능을 직접 조절하여 기준에 명시된 강도기준을 만족시킬 수 있다. 그러나 풍하중과 같은 횡하중에 대한 구조시스템의 횡방향 이동과 진동에 관련한 변위 또는 가속도 반응을 조절하는 강성설계는 특정한 몇몇 구조 부재들의 단면 성능을 수정하여 강성 요구조건을 만족시키기 어렵다.

또한 설계자의 경험과 직관에 의존한 기존 방법으로는 강성설계의 효율성을 기대하기 힘들다. 그러므로 횡하중의 영향이 크고 많은 수의 부재로 구성되는 고층건물의 구조설계에서는 효율적인 강성설계법의 개발이 요구된다.

최적화기법을 이용한 고층건물의 효율적 구조 설계에 관한 연구가 오랫동안 진행되고 있으나 대부분의 최적화 기반 변위 조절 설계법은 민감도해석이나 반복적인 구조해석으로 인한 과도한 계산량의 요구 및 최적화 알고리즘 자체의 안정성에 관한 문제 등으로 인하여 실무 적용에는 아직 여러 가지 한계가 있다.(Papadrakakis, 1993; Cohn 등, 1994; Leith 등, 1999; Park 등, 2002)

1) 정회원, 연세대학교 건축공학과 부교수, 공학박사  
(Tel. 02-2123-2794, Fax. 02-365-4668, E-mail : hspark@yonsei.ac.kr)

2) 정회원, 연세대학교 건축공학과 박사과정(seojh@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

이에 대한 대안으로 반복회수와 수렴에 요구되는 시간을 최소화할 수 있는 근사최적화 기법의 개발이 시도되어 왔다. 대표적인 예가 최적성기준법 (Optimality Criteria)으로 구조물의 중량과 변위 및 부재력 등의 구조 반응을 각각 목적함수와 제약함수로 정식화 한다는 점에서는 기존 최적화 기법과 같다.(Hafka, 1993) 최적성기준법에서 사용되는 최적성 기준은 목적함수와 제약함수를 라그랑지계수법 (Lagrange Multiplier Technique)을 이용하여 무제약 가목적함수로 라그랑지 함수를 구성한 후 최적해에 대한 필요조건을 1차 미분을 이용하여 유도한다. 그러나 최적성기준법은 정확한 수학적 최적해를 찾는 것이 아니며 문제에 따라 달리 결정되는 반복수정알고리즘 (Recursive Resizing Algorithm)을 이용하여 최적성 기준이 만족될 때까지 각 부재의 단면성능을 조정하여 근사최적해를 찾는 기법이다.

Chan 등은 최적성기준법을 강도제약과 변위제약을 가지는 고층건물의 변위조절설계에 적용하였으며 12.5시간에 걸쳐 5회의 반복으로 근사최적해로 수렴하였음을 보고하였다.(Chan 등, 1993; Chan 등, 1995) 최적성기준법은 기존 최적화기법에 비하여 근사최적해를 찾는 데 소요되는 반복 횟수가 많이 감소할 수 있으나 여전히 반복적 구조해석이 요구되며 특히 1차 미분에 의하여 최적성 기준이 유도되기 때문에 민감도해석이 또한 요구되는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완한 변위조절설계기법은 구조물을 구성하는 모든 부재의 변형에너지밀도 (Strain Energy Density)가 균일하도록 부재의 단면성능을 조절하는 재분배 기법 (Resizing Algorithm) 형식으로 개발되어 고층건물의 변위조절설계에 적용되고 있다. 재분배기법에서는 기존 최적화기법 및 최적성기준과는 달리 목적함수를 조절하고자하는 변위로 그리고 제약조건을 구조물의 중량으로 정식화한다. 또한 구조물의 변위를 구조해석이 아닌 에너지 이론을 이용하여 각 부재들의 조절하고자하는 변위에 대한 변위기여도 (Member Displacement Participation Factor)의 합으로 계산하게 된다. 그리고 부재의 변위기여도는 해당 부재의 단면 성능에 반비례한다는 가정을 이용하여 최적성기준법과는 달리 반복해석과 민감도 해석 없이 근사 최적해를 구하게 되므로 변위조절설계법의 단점을 해결하고 있다.

Baker(1990), Charney(1991), Wada(1991)은 에너지 이론에 근거하여 반복적인 구조해석 없이 건물의 변위를 제어하는 변위설계법을 소개하였으며, Park 등(1997)은 단위하중법을 이용하여 변위기여도를 구하고, 이를 근거로 하여 물량을 재분배함으로써 전체 구조물의 물량의 변화없이 고층 건물의 변위를 제어하는 방법을 소개하였으며 변위기여도는 민감도 계수와 근사한 값임을 증명하였다. 그 후 Park 등

(1998)은 고층 강 구조물에 적용 가능한 재분배기법을 이용한 고층건물 변위설계법을 제안하였다. Park 등(2002)은 강재의 탄성계수와 RC 전단벽의 탄성계수 비를 이용하여 강접골조-전단벽 구조물의 변위제어에 적용할 수 있는 변위설계법을 제안하였다.

위에서 언급한 재분배기법을 이용한 변위설계법(Park 등, 1997; Park 등, 1998; Park 등, 2002)은 민감도 해석이나 반복적인 구조해석 없이 구조물의 물량을 재분배함으로써 변위를 효과적으로 제어할 수 있는 실용적 변위조절기법이다. 또한 재분배기법에 의한 변위설계법은 강도설계를 만족하는 초기 설계에 적용하여 조절하고자 하는 변위를 최소화하되 제약조건으로 전체 구조물량에는 변화가 없도록 각부재의 단면 성능이 재분배되도록 정식화되어 있다. 그러므로 재분배 기법에 의한 변위조절설계 결과는 초기 설계에 의한 구조물의 물량은 그대로 유지하면서 변위를 최소화한 것이다.

이러한 경우 초기설계에 따라 재분배 후 조절된 변위가 설계 변위 수준 보다 크거나 작게 된다. 조절된 변위가 설계 변위 보다 작은 경우는 초기설계 보다 물량을 감소시켜 설계 변위 조건을 만족시킬 수 있음을 의미한다. 반대로 조절된 변위가 설계 변위 보다 큰 경우는 설계변위 조건을 만족시키기 위하여 추가적인 물량이 요구됨을 의미한다. 그러나 현재까지 개발된 재분배기법에 근거한 변위조절설계법에 의하면 물량 제약 조건에 의해서 구조물 전체의 중량을 적절하게 조절할 수 없다.

그러므로 본 연구에서는 기존 연구(Park 등, 1997; Park 등, 1998; Park 등, 2002)에서 제안된 변위제어를 위한 정식화에 중량 조절계수를 도입하여 새로운 정식화를 구성함으로써 설계자가 구조 물량을 임의대로 조정하면서 변위설계가 가능한 변위설계법을 개발하였다. 기존 재분배 기법을 이용한 변위설계법의 구조 물량은 초기 설계에 영향을 받을 수밖에 없었으나 본 연구에서 제안된 변위 설계법은 초기 설계의 물량에 영향을 받지 않게 된다. 개발된 변위설계법은 20층 강접-골조 RC 전단벽 구조물과 60층 아웃리거 구조물의 변위설계에 적용하여 그 효율성을 평가하였다.

## 2. 중량 조절계수를 포함한 정식화

재분배과정에서 물량 분배의 근거가 되는 변위기여도는 구조해석 결과인 부재력을 이용하여 구해지며 변위기여도는 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 기여도를 나타내는 것으로서 식 (1)과 같이 표현된다. 제어하고자 하는 변위( $\delta_j$ )는 각 부재 변위기여도( $\delta_i$ )의 합으로 표현된다. 변위기여도

는 식 (1)과 같이 축력, 전단력, 모멘트 등의 부재력과 이에 대한 축 강성, 전단강성, 휨강성 등의 관계에 의해서 구해진다. 본 연구에서는 부재 성능 중에서 부재 단면적을 설계 변수로 하고 나머지 부재 성능은 단면적과의 상관관계(회귀분석)에 의해서 구해진다.

정식화에서는 부재 단면적과 동일한 개념으로 사용될 수 있는 부재 물량을 이용하여 목적함수 및 제약함수를 구성한다.

$$\begin{aligned} \delta_i &= \sum_{i=1}^k \delta_i = \sum_{i=1}^k (\delta_i^n + \delta_i^m + \delta_i^v) \\ &= \sum_{i=1}^k \left\{ \int_0^l \frac{N_i^L N_i^U}{EA_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^L M_i^U}{EI_i} dx \right. \\ &\quad \left. + \alpha \int_0^l \frac{V_i^L V_i^U}{GA_i} dx \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\delta_i$ ,  $\delta_i$ 는 각각 제어하고자 하는 건물 최상층의 변위와  $i$ 번째 부재의 변위기여도를 나타내며,  $\delta_i^n$ ,  $\delta_i^m$ ,  $\delta_i^v$ 은 각각  $i$ 번째 부재의 축력, 모멘트, 전단력에 의한 변위기여도를 나타낸다. N, M, V는 각각 축력, 모멘트, 전단력을 나타내며, 상첨자 L과 U는 각각 실재하중과 단위하중을 나타내며, k는 전체 부재수를 나타낸다.

본 논문에서는 초고층 건물의 대표적 구조시스템인 프레임-전단벽 시스템을 대상으로 하여 재분배 기법을 식 (2)~식 (4)와 같이 정식화 하였다. 목적함수는 제어하고자 하는 구조물 최상층 변위( $\delta$ )를 최소화하는 것으로서, 최상층 변위는 강재의 변위기여도( $\delta$ )와 RC 전단벽의 변위기여도( $\delta$ )의 합으로 구해질 수 있으며, 변위기여도는 물량에 반비례한다고 가정하였다. 변위 기여도는 재분배 후 물량의 변화에 반비례하는 것으로 가정한다. 그리고 부정정 구조물의 경우 재분배에 따라 단면성능이 변화하면 부재력이 변화하지만 본 논문에서는 식 (1)의 부재력들은 단면성능 변화에 따라 변화하지 않는 것으로 가정하여 계산한다.

기존 연구(Park 등, 1997; Park 등, 1998; Park 등, 2002)에서 제약함수는 재분배 후 전체 물량의 변화가 없는 것으로 하였으나 본 연구에서는 제약함수에 중량 조절계수( $\alpha$ )를 도입하여 재분배 후 물량을 설계자의 임의대로 조절할 수 있도록 수정된 정식화를 제안하였다. 철근 콘크리트 전단벽 부재는 시공을 고려하여 재분배 후의 전단벽 두께에 부 구속(Side Constraints) 조건을 식 (4)과 같이 추가하였다. 기존의 정식화와 다른 점은 제약함수에 중량 조절계수가 포함되어 있다는 것이다. 기존의 정식화는 식 (3)의 제약조건에서

중량 조절계수가 없는 형태로서, 등호 왼쪽의 초기 물량과 등호 오른쪽의 재분배 후 물량이 동일하다는 제약조건이 가해진다. 이에 반해서 본 연구에서는 식 (3)와 같이 제약조건에 중량 조절계수를 도입하였다. 식 (3)에서 등호 왼쪽 괄호안의 초기 물량에 중량 조절계수를 곱한 물량과 오른쪽 괄호안의 재분배 후 물량이 동일하도록 제약함수를 구성하고 있다. 단순한 정식화의 변화이지만 이 방법을 이용하면 초기물량의  $\alpha * 100\%$ 의 물량으로 재분배를 할 수 있으므로 재분배 후의 물량은 초기 물량의 영향을 받지 않게 된다.

$$\text{Minimize } \delta_i = \sum_{i=1}^{ms} \frac{\delta_i}{\beta_i} + \sum_{j=1}^{mc} \frac{\delta_j}{\beta_j} \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \alpha \left\{ \sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j \right\} = \sum_{i=1}^{ms} \beta_i W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \beta_j W_j \quad (3)$$

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

여기서,  $\beta_i$ ,  $\beta_j$ 는 각각  $i$ 번째 철골 부재와  $j$ 번째 철근 콘크리트 부재의 물량 수정계수를 나타낸다.  $W_i$ ,  $W_j$ 는 각각  $i$ 번째 철골 부재와  $j$ 번째 철근 콘크리트 부재의 물량을 나타내며, ms, mc는 각각 강재와 콘크리트의 부재수를 나타낸다.  $\beta_L$ ,  $\beta_U$ 는 재분배 후 철근 콘크리트 물량 수정 계수의 상·하한치를 나타내며, n은 콘크리트 물량을 강재 물량으로 치환하기 위한 콘크리트의 탄성계수에 대한 강재의 탄성계수 비를 나타낸다.  $\alpha$ 는 중량 조절계수로서 이를 이용하여 설계자는 재분배 후 물량을 임의로 조정할 수 있다. 재분배 후 전단벽 이외의 부재들의 단면성능이 급격하게 변화하는 경우 수정계수의 상한과 하한을 정하여 식 (4)와 같은 형식으로 부재단면의 급격한 변화를 제한할 수 있다.

만약,  $\alpha$ 를 0.9로 정하면 재분 후 물량은 초기 물량의 90%로 변경되면서 변위가 최소화되도록 물량이 분배되어진다. 위와 같은 제약 최소화 문제를 라그랑지 승수를 이용하여 무제약 최소화 문제로 치환시킨 후 K-T 조건(Kuhn-Tucker Condition)을 이용하여 정리하면, 물량 수정계수  $\beta_i$ ,  $\beta_j$ 는 식 (5), (6)과 같이 구해진다.

$$\beta_i = \alpha \sqrt{\frac{\delta_i}{W_i}} \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad i = 1, \dots, ms \quad (5)$$

$$\beta_j = \alpha \sqrt{n \frac{\delta_j}{W_j}} \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad j = 1, \dots, mc \quad (6)$$

여기서,

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

K-T 조건에 의해서 얻어진 물량 수정계수  $\beta_i, \beta_j$ 를 식 (7), 식 (8)과 같이 설계변수로 사용된 초기 단면적( $A_i^{ini}$ ,  $A_j^{ini}$ )에 곱하여 부재단면적을 수정함으로써 물량을 재분배(Resizing)한다.

$$A_i^{new} = A_i^{ini} \times \beta_i \tag{7}$$

$$A_j^{new} = A_j^{ini} \times \beta_j \tag{8}$$

### 3. 예제 적용

본 논문에서는 재분배 후 물량을 중량 조절계수를 사용하여 초기 물량의 80% ( $\alpha = 0.8$ ), 100% ( $\alpha = 1.0$ ), 120% ( $\alpha = 1.2$ )로 조절할 경우 변위조절설계 설계에 따른 변위, 층간변위, 물량 등을 비교 분석하였다. 중량 조절계수는 초기 물량에 대한 재분배 후 물량에 대한 비율로 생각할 수 있으며, 예를 들어  $\alpha = 0.8$ 인 경우는 재분배후 물량이 80%가 된다. 즉, 초기 물량의 80%만으로 재분배가 되어진다.

#### 3.1 20층 예제

예제로 사용된 20층 강접골조 전단벽 구조물은 높이 80 m, 밑면길이 36 m이며, 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 전단벽으로 구성되어 있으며 형상은 그림 1과 같다. 초기 설계에 사용된 철골 부재의 종류와 전단벽의 두께는 표 1과 같으며 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 2400kgf/cm<sup>2</sup>, 2.1x10<sup>6</sup>kgf/cm<sup>2</sup>이며, 철근의 항복강도는 4000kgf/cm<sup>2</sup>이며, 전단벽의 콘크리트 강도와 탄성계수는 각각 240kgf/cm<sup>2</sup>, 2.3x10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>이다. 하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 풍하중을 작용시켰으며, 연직하중은 7000kgf/m의 등분포 하중을 보에 작용시켰다.

본 예제의 초기 부재는 건축학회의 강도설계 기준에 따라 철골 부재는 AIK-ASD83, 전단벽 부재는 AIK-USD94를 만족하도록 선택되었다. 개발된 중량 조절계수를 이용한 변위 조절설계법은 강도설계 모듈과 결합하여 그림 2와 같은 고층

건물 변위설계 모델로 구성된다.

#### 3.1.1 $\alpha = 0.8$ 인 경우

표 2는 재분배 시 전체 물량을 초기 물량의 80%로 조절하며 재분배했을 경우, 변위설계에 따른 변위기여도, 물량 및 최대 층간변위의 변화를 나타내며, 팔호 안의 값은 각 항목별 초기 값에 대한 비율을 나타낸다. 표 2에 표기된 변위기여도는 단위하중을 최상층에 가했을 경우, 각 부재들의 변위기여도를 합한 것으로서 구조물 최상층 변위를 나타낸다. 표 2의 변위기여도는 초기, 재분배후 및 강도 체크 후 단계에서는 초기 해석에서 얻은 부재력을 사용하여 구한 값이며, 재해석단계에서는 수정된 설계된 구조물을 재해석을 통하여 얻은 부재력을 사용하여 얻은 값이다. 초기 해석에서 얻은 부재력을 이용하여 예측된 구조물의 최상층 변위는 11.73cm로서 상용 구조 해석 소프트웨어(MIDAS)에서 구해진 11.60cm와 근사하다. 변위설계 모델 적용시 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 물량이 초기 물량의 80%가 되도록 재분배하면, 예측 변위는 11.33cm로서 초기 변위의 97%로 감소한다. 강도 체크단계에서 1층~9층의 내부 기둥과 1층, 2층의 내·외부 보의 물량이 증가하여 초기 물량의 84%가 되며, 이때 변위는 11.03cm로 초기변위의 94%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 모델을 상용 구조해석 소프트웨어(MIDAS)로 재해석 하면, 변위는 9.55cm로서 예측된 변위 11.03cm와는 15%의 오차를 보인다. 이러한 오차는 물량 재분배로 인한 강성의 변화와 이로 인한 응력 재분배 현상에 의한 것이다.

상용 소프트웨어(MIDAS)의 재해석에서 얻어진 부재력을 이용하여 예측된 변위는 9.70cm로서 상용 소프트웨어(MIDAS)를 통해 얻어진 변위 9.55cm와 유사하다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 0.75cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후에는 0.66 cm로서 13층에서 발생한다. 변위설계 모델 적용에 따른 부재 종류별 물량과 변위기여도는 그림 3, 그림 4와 같다.

표 1. 20층 예제 구조물의 초기 설계 부재종류

부재 구분	층수	부재종류
기둥	16-20	H-350x350x11x19
	11-15	H-406x403x16x24
	6-10	H-428x407x20x35
	1-5	H-458x417x30x50
보	1-20	H-488x300x11x18
전단벽 두께 (cm)	16-20	20
	11-15	30
	6-10	40
	1-5	50

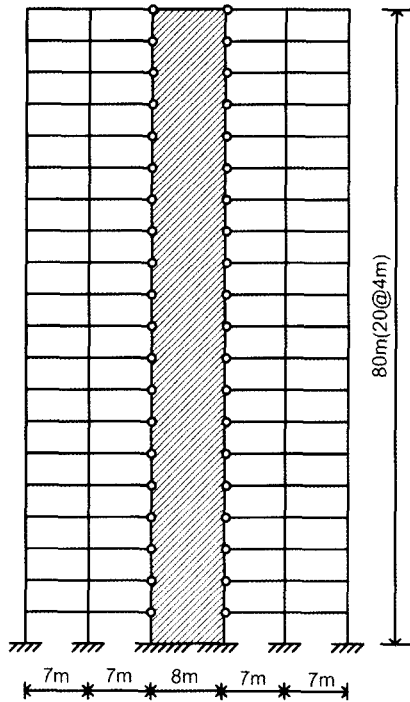


그림 1. 20층 예제 구조

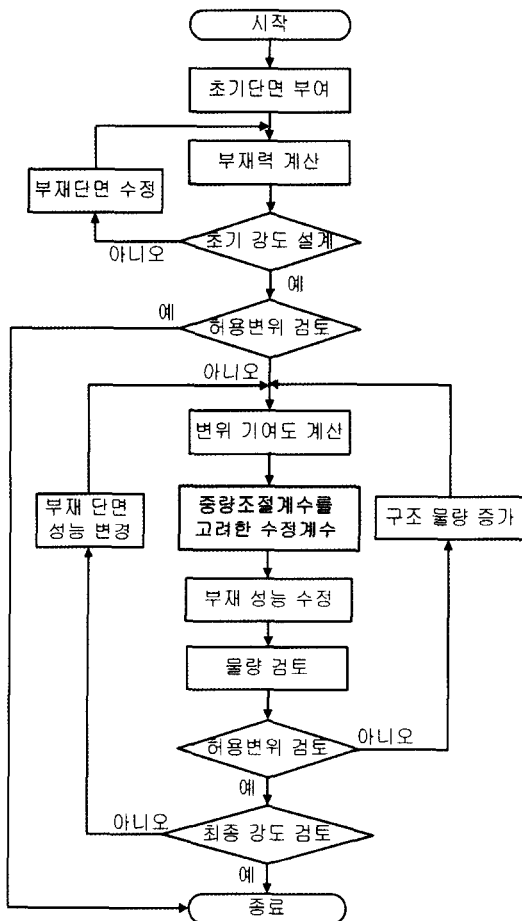


그림 2. 고층건물 변위설계 모델

표 2. 물량과 변위기여도의 변화 (  $\alpha = 0.8$  )

구분	초기 <sup>*</sup>	재분배후 <sup>*</sup>	강도 체크후	재해석 <sup>**</sup>
전체물량 (tonf)	374.45 (100%)	299.56 (80%)	312.18 (84%)	312.18 (84%)
변위기여도 (cm)	11.73 (100%)	11.33 (97%)	11.03 (94%)	9.70 (83%)
상용 소프트웨어 (cm)	최대 변위 (100%)	-	-	9.55 (82%)
	최대층간 변위 (100%)	-	-	0.66 (88%)

표 3. 물량과 변위기여도의 변화 (  $\alpha = 1.0$  )

구분	초기 <sup>*</sup>	재분배후 <sup>*</sup>	강도 체크후	재해석 <sup>**</sup>
전체물량 (tonf)	374.45 (100%)	374.45 (100%)	383.57 (102%)	383.57 (102%)
변위기여도 (cm)	11.73 (100%)	8.54 (73%)	8.39 (72%)	7.28 (62%)
상용 소프트웨어 (cm)	최대 변위 (100%)	-	-	7.16 (62%)
	최대층간 변위 (100%)	-	-	0.49 (65%)

표 4. 물량과 변위기여도의 변화 (  $\alpha = 1.2$  )

구분	초기 <sup>*</sup>	재분배후 <sup>*</sup>	강도 체크후	재해석 <sup>**</sup>
전체물량 (tonf)	374.45 (100%)	449.34 (120%)	455.77 (122%)	455.77 (122%)
변위기여도 (cm)	11.73 (100%)	7.05 (60%)	6.97 (59%)	5.69 (49%)
상용 소프트웨어 (cm)	최대 변위 (100%)	-	-	5.58 (48%)
	최대층간 변위 (100%)	-	-	0.37 (49%)

\*: 변위기여도 예측시 초기 해석에서 얻은 부재력 사용

\*\* : 변위기여도 예측시 수정된 구조물을 재해석하여 얻은 부재력 사용

### 3.1.2 $\alpha = 1.0$ 인 경우

표 3은 재분배후 전체 물량이 초기 물량과 동일하게 재분배되었을 경우, 변위설계 적용에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다. 초기 모델에 대한 예측 변위는 11.73cm이며, 중량 조절계수를 이용하여 재분배 후 전체 물량이 초기 물량과 동일하게 재분배하였다. 재분배 후 예측 변위는 8.54cm로서 초기 변위의 73%로 감소한다. 강도 체크단계에서 1층~7층의 내부 기둥과 외층 1층 보와 내층 1, 2층 보의 물량이 증가하여 초기 물량의 102%가 되며, 이때 변위는 8.39cm로 초기 변위의 72%로 감소한다. 검증용 위해 수정된 모델을 상용 구조해석 소프트웨어(MIDAS)를 이용하여

재해석 하여 얻은 변위는 7.16cm이며 최대 층간변위는 0.49cm로서 13층에서 발생한다.

### 3.1.3 $\alpha = 1.2$ 인 경우

표 4는 재분배후 전체 물량이 초기 물량의 120%가 되도록 재분배 했을 경우, 변위설계 적용에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다. 초기 모델에 대한 예측 변위는 앞의 두 경우와 동일하다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배 후 전체 물량이 초기 물량의 120%가 되도록 재분배하면, 재분배 후 예측변위는 7.05cm로서 초기 변위의 60%로 감소한다. 강도 체크단계에서 1층~6층의 내부 기둥과 내외 측 1층 보의 물량이 증가하여 초기 물량의 122 %가 되며, 이때 변위는 6.97cm로 초기변위의 59%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 모델을 상용 구조해석 소프트웨어(MIDAS)를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 5.58cm이다. 변위설계 후 최대 층간변위는 0.37cm로서 12층에서 발생한다.

### 3.1.4 결과 정리 및 분석

중량 조절계수를 변화시키면서 변위조절설계를 적용한 결과, 최종 부재별 물량과 변위기여도는 그림 3, 그림4와 같다. 최종적으로 기둥의 물량은 전반적으로 감소하는 경향을 보이며, 이에 따라 변위기여도는 증가하는 경향을 보인다. 보의 물량은 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 변위기여도는 감소하는 경향을 보인다. 이것은 보의 물량을 증가시키는 것이 변위 제어에 유리하다는 것을 의미한다. 전단벽의 변위기여도는 물량의 증감에 상관없이 감소하는 경향을 보이는데 이는 초기설계에서 전단벽 설계가 변위제어 측면에서는 비효율적이었다는 반증이 될 수 있다. 각 층별로 물량의 변화를 살펴보면 재분배 후 물량이 어떻게 분배 되었는지 알 수 있다.

그림 5, 그림 6은 변위 설계 적용에 따른 철골골조, RC 전단벽의 최종 층별 물량을 보여준다. 철골 골조의 물량은 하부층에서는 감소하고 상부 층에서 증가하는 경향을 보이며, 전단벽의 물량은 하부 층에서는 증가하고 상부 층에서는 감소하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 부 구속 조건을 이용하여 재분배후 전단벽의 물량이 초기 물량의 50% 범위를 벗어나지 않도록 제약하여 하였으므로, 변위조절 설계 후 상하부의 전단벽 물량은 부 구속 조건(Side Constraints)에 의해서 초기 물량의 50%로 제한되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 물량 분배의 결과는 강접골조 전단벽 구조물의 일반적인 거동 특성인 상호작용(Inter-action)을 효과적으로 발휘하기 위한 형태로 바뀐 것으로 분석된다.(Taranath, 1998)

그림 7, 그림 8은 중량 조절계수를 이용한 변위설계 모델 적용에 따른 변위와 층간 변위의 변화를 나타낸다. 변위설계

모델 적용에 따라 변위와 층간변위는 효과적으로 감소하는 경향을 보인다. 표 5는 중량 조절계수를 이용한 변위설계 모델 적용에 따른 물량, 최상층 변위, 최대 층간변위를 나타낸다. 각 경우에서 물량의 결과는 최종 변위를 얻기 위한 적정의 물량으로 생각될 수 있다. 그림 9는 본 예제에 대해서 변위설계 후 얻어진 물량과 변위의 관계를 나타내는 것으로서 본 예제에서 목표 변위에 대한 적정 물량에 대한 가이드 라인으로 제시될 수 있다. 이 그래프에 초기 설계안은 그래프 보다 상당히 위쪽에 위치함으로서 효과적이지 못한 설계라는 것을 알 수 있다. 본 예제는 그림 2와 같은 설계과정을 거치는 동안 변위 제어 후 강도설계에 의한 물량의 증가량이 크지 않으므로 변위와 물량의 관계가 일정한 관계를 가지는 것으로 표현되었다.

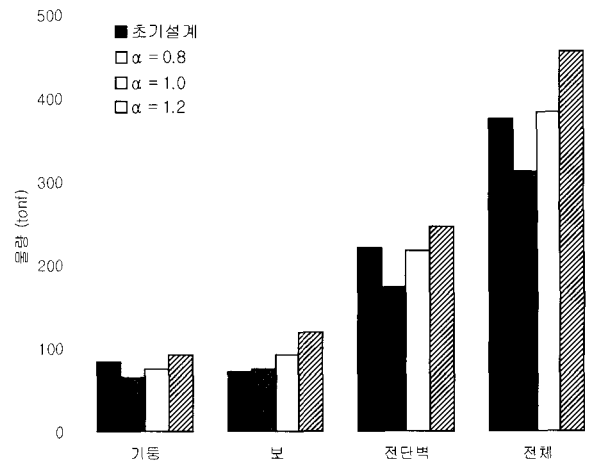


그림 3. 최종물량

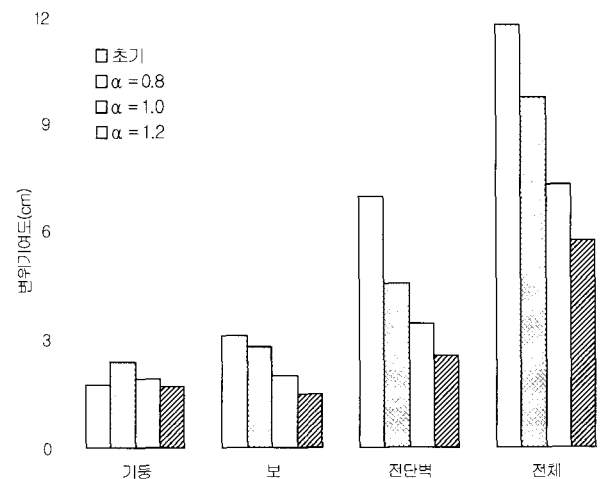


그림 4. 최종 변위기여도

표 5. 결과 정리(20층 예제)

구분	물량 (tonf)	변위 (cm)	최대 층간변위 (cm)
초기설계	374.45	11.60	0.75
$\alpha = 0.8$	312.18 (84%)	9.55 (82%)	0.66 (88%)
$\alpha = 0.9$	347.75 (93%)	8.14 (70%)	0.56 (75%)
$\alpha = 1.0$	383.57 (102%)	7.16 (62%)	0.49 (65%)
$\alpha = 1.1$	419.59 (112%)	6.33 (55%)	0.45 (60%)
$\alpha = 1.2$	455.77 (122%)	5.58 (48%)	0.37 (49%)

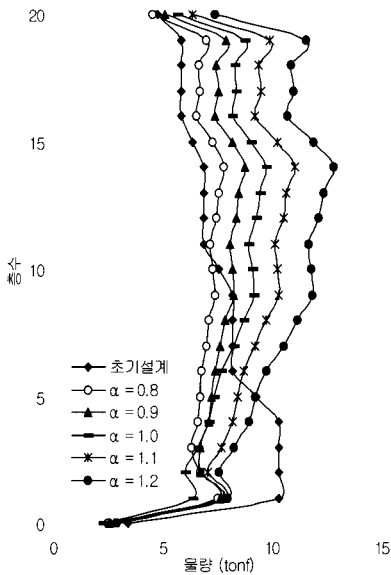


그림 5. 철골 물량

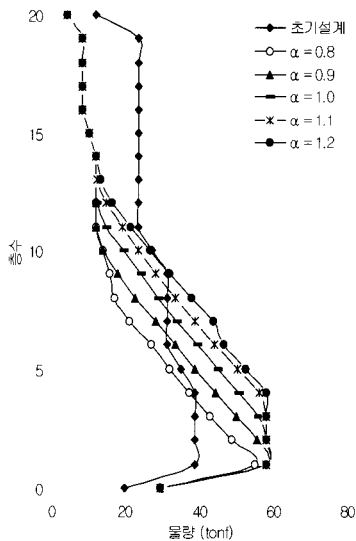


그림 6. 전단벽 물량

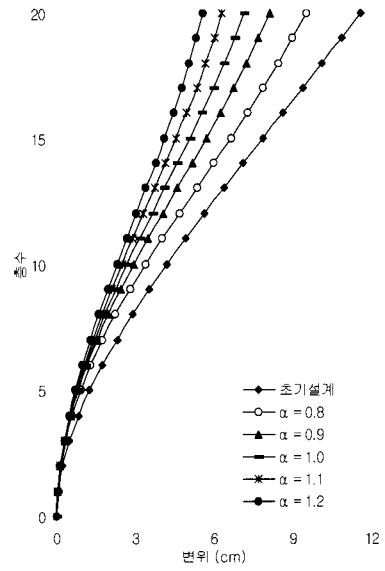


그림 7. 변위

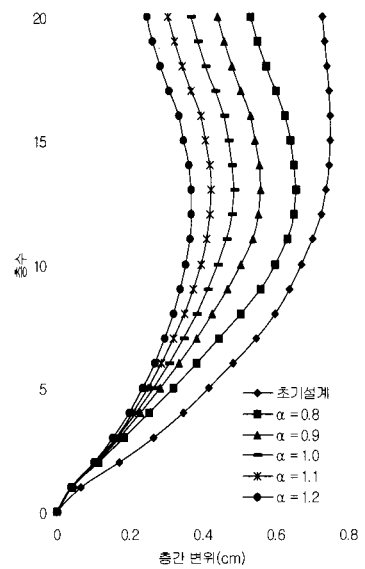


그림 8. 층간 변위

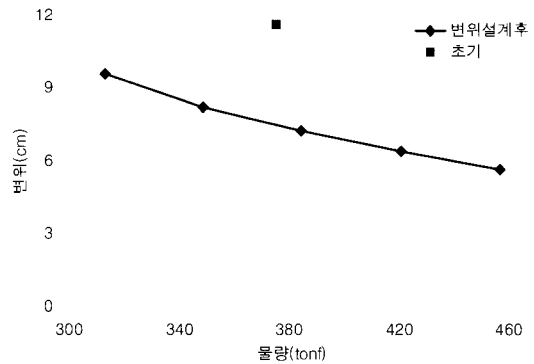


그림 9. 물량과 변위관계 (20층 예제)

### 3.2 60층 예제

60층 아웃리저 구조물 예제는 철골, 철근 콘크리트 전단벽과 아웃리저로 구성된 구조물로서 단면은 그림 10과 같다. 전체 높이는 196.5m이며 층고는 기준층, 아웃리저 층, 설비층이 각각 3.2m, 4.5m, 3.5m이고 밑면 길이는 42.6m이다. 39층에 설치된 아웃리저는 전단벽과는 강접으로 연결되어 있으며, 기둥과는 핀으로 연결되어 있다. 아웃리저 수평부재와 인방 보(lintel beam)를 제외한 보 부재는 기둥과 핀으로 연결되어 중력하중만을 부담하도록 설계되었다.

본 예제의 초기 부재는 건축학회의 강도설계 기준을 따라 철골 부재는 AIK-ASD 83, 전단벽 부재는 AIK-USD 94를 만족하도록 선택되었다. 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 3,300kgf/cm<sup>2</sup>, 2.1x10<sup>6</sup>kg/cm<sup>2</sup>이며, 철근의 항복강도는 4000kgf/cm<sup>2</sup>, 콘크리트 강도 및 탄성계수는 각각 400kgf/cm<sup>2</sup>, 2.8x10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>이며, 전단벽의 두께는 1-2층, 3-38층, 39-60층에서 각각 90cm, 70cm, 50cm로 설계되었다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 산정하였으며 건물에 +x, -x 방향으로 작용시켰다. 연직하중은 보에 작용하는 5880kgf/m의 등분포 하중으로 가정하였다.

#### 3.2.1 결과 정리 및 분석

60층 아웃리저 구조물에 본 연구에서 제안한 중량 조절계수를 이용한 변위조절 설계법을 적용한 결과는 표 6과 같다.

각 경우에서 물량의 결과는 최종 변위를 얻기 위한 적정 물량으로 생각될 수 있으며, 이 중 목표 변위와 근사한 경우가 설계 대안의 하나로 채택될 수 있다. 표 6에서 중량 조절계수를 이용하여 재분배 후 물량을 초기 물량의 80%로 조절했음에도 불구하고 최종 물량은 초기 물량의 99%가 된 것을 알 수 있다. 이러한 물량의 증가 이유는 그림 2와 같은 설계 순서에 따라서 재분배 후 강도 체크 단계에서 19%의 물량이 증가한 것이다. 이와 같이 강도제약에 의해서 증가된 물량은 변위 제어에는 효과적이지 못하다. 이에 반해 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 물량이 초기 물량의 100%가 되도록 한 경우에는, 초기 물량과 동일한 물량으로 재분배를 한 후, 강도설계 단계에서 2%의 물량이 증가하게 되므로 전체 물량 측면에서는  $\alpha=0.8$ 인 경우와 큰 차이가 없지만 변위 제어 측면에서는 보다 효과적인 것을 알 수 있다. 재분배기법에서는 각 부재들의 변형에너지를 이용하여 변형에너지가 작은 부재들의 물량을 변형에너지가 큰 부재들로 분배하여 모든 부재들의 변형에너지가 같아지도록 하여 변위를 조절한다. 그리고 이러한 변위조절과정에서 부재별 강도조건은 고려하지 않는

다. 강도 조건은 변위가 조절된 후 추가적으로 검토하게 된다. 이러한 이유로 물량수정계수 1.0의 경우는 변형에너지를 고려하여 변위를 조절한 경우 변위는 61%로 감소하고 강도 조건 검토에서 2%의 물량이 추가되었으며 그리고 0.8의 경우는 초기물량의 80%를 가지고 변형에너지 측면에서만 재분배되면 재분배에 활용되는 물량이 1.0의 경우 보다 20% 적으므로 변위는 1.0의 경우 보다 다소 큰 값인 76%로 감소하게 된다. 그러나 이 경우 전체 물량이 20% 감소하는 것을 고려하였으므로 부재 강도 측면에서는 강도 조건 위배율이 1.0의 경우 보다 높기 때문에 추가적인 물량이 19%로 증가한다.

그림 11, 그림 12는 중량 조절계수를 이용한 변위설계 모델 적용에 따른 변위와 층간 변위의 변화를 나타낸다. 변위설계 모델 적용에 따라 변위와 층간변위는 감소하는 경향을 보인다. 그림 12의 층간변위 그래프에서 12층, 50층, 53층의 층간 변위가 인근의 층에 비해서 상대적으로 큰 것은 그 층의 층고가 3.5m로서 기준층에 비해 높기 때문이며, 39층 부분에서 층간 변위가 급격히 감소하는 것은 그 부분에 아웃리저가 설치되어 있기 때문이다. 그림 13은 본 예제에 대해서 변위설계 후 얻어진 물량과 변위의 관계를 나타내는 것으로서 본 예제에서 목표 변위에 대한 적정 물량에 대한 가이드 라인으로 이용될 수 있다. 이 그래프에 초기 설계안은 그래프의 보다 상당히 위쪽에 위치함으로써 효과적이지 못한 설계라는 것을 알 수 있다.

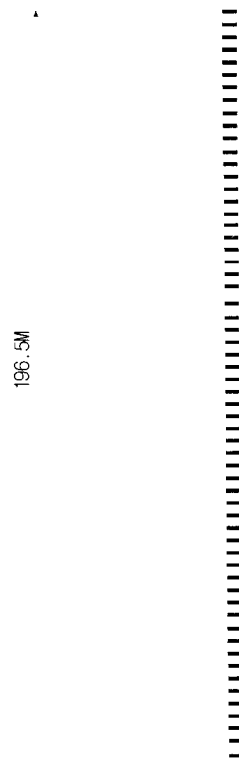


그림 10. 60층 예제



표 6. 결과 정리 (60층 예제)

구분	물량 (tonf)	변위 (cm)	최대 층간변위 (cm)
초기설계	2497.93	31.68	0.66
$\alpha = 0.8$	2467.29 (99%)	24.18 (76%)	0.55 (83%)
$\alpha = 1.0$	2530.88 (102%)	19.35 (61%)	0.43 (65%)
$\alpha = 1.2$	3001.93 (120%)	16.29 (51%)	0.37 (56%)

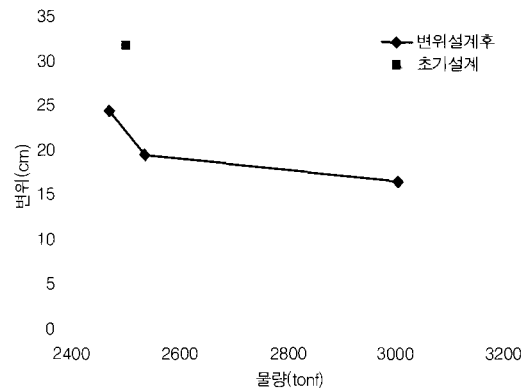


그림 13. 물량과 변위관계 (60층 예제)

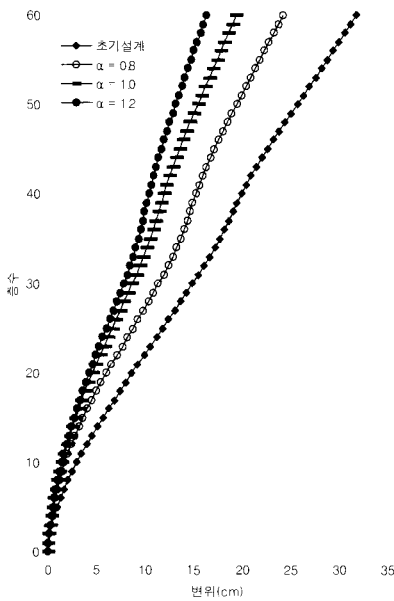


그림 11. 변위 (60층 예제)

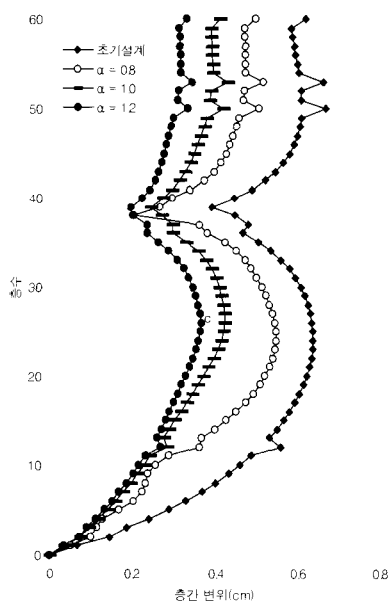


그림 12. 층간 변위 (60층 예제)

#### 4. 결론

개발된 중량 조절계수를 이용한 변위설계법을 20층 강접 골조 전단벽 구조물과 60층 아웃리저 구조물의 변위설계에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중량 조절계수를 이용한 변위설계법은 구조 물량을 설계자의 임의대로 조절하면서 건물의 변위를 효과적으로 제어 할 수 있었다.
- (2) 중량 조절계수를 이용하여 변위 설계 후 물량을 작게 하면 강도제약 조건에 의한 물량의 증가량이 커질 수 있으며 변위 제어 효율성도 감소할 수 있다.

이와 같이 중량 조절계수를 이용한 변위조절설계법을 이용하여 구조 물량과 변위의 관계 구하면, 목표 변위를 얻기 위한 적정 물량에 대한 가이드 라인으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 2003년도 건설교통부 건설기술연구개발사업의 지원에 의한 결과의 일부임.

과제번호: C102A1000004-03A0200-00410

#### 참고 문헌

- AIK. (2000) Standard Design Loads for Buildings, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea.
- 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., and 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*, Vol. 2, No. 1, pp. 17-32.
- Chan, C.M., Grierson, D.E., and Sherbourn, A.N. (1995) Automatic Optimal Design of Tall Steel Building Frameworks, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 838-847.
- Charney, F. A. (1991) 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., pp. 91-98.
- Cohn, M. Z. and Dinovitzer A. A.(1994) Application of Structural Optimization. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, Vol. 120, No. 2, pp. 617-650.
- Haftka, R.T. and Gurdal, Z. (1993) *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers.
- Leith J.P.B. and Topping B.H.V. (1999) Parallel simulated annealing for structural optimization. *Computer and Structure.*, 73, 545-564.
- Papadrakakis M. (Ed). (1993) *Solving Large-scale problems in mechanics*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc.
- Park Hyo Seon, Ahn Sun A.(1998) Resizing Methods for Drift Control of Tall Steel Structures, *Structural Steel PSSC 98 Vol 2*. pp1017-1022.
- Park, H. S., Hong, K. P. and Seo, J. H.(2002) Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 11, No. 2, pp. 35-49.
- Park, H. S., and Park, C. L. (1997) Drift control of high-rise buildings with unit load method, *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 6, No. 1, pp. 23-35.
- Park, H.S. and Sung, C.W. (2002) Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computer, *Comp. Struct.*, Vol. 80, pp. 1305-1316.
- Taranath B. S. (1998) *Steel Concrete & Composite Design of Tall Buildings*, McGraw-Hill.
- 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., pp. 91-98.
- (접수일자 : 2004. 11. 15 / 심사일 2004. 11. 23 / 심사완료일 2005. 5. 20)