

중량 수정계수를 고려한 변위조절설계법 개발

Development of Drift Design Methods with Weight Modification Factors

서 지 현 * 박 효 선 **
Seo, Ji Hyun Park, Hyo Seon

Abstract

In the drift design of high-rise buildings, once the geometry and dimensions of a structure are predetermined, engineer's remaining work is determination of the member size to satisfy the strength and the stiffness requirements. For the case of highrise buildings, designs are determined by the stiffness requirements at the final stage of structural design. Thus, engineers try to find a minimum weight design with maximum lateral stiffness. However, there is no guideline for engineers on the required weight of structures per unit area to satisfy the stiffness requirements. In this study, drift design method considering weight modification factors are presented and applied to a 20-story structure. The proposed drift design method considering weight modification factors may give the guideline for engineers on the amount of structural weight to attain target displacement.

1. 서론

1.1. 연구 목적

효율적인 고층건물 구조설계를 위해서는 건물 계획 단계에서 적절한 횡하중 저항시스템과 이를 구성하는 주요 부재의 배치 및 크기를 결정하는 것이 최선의 방법이나 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 대부분의 고층 건물의 구조설계는 건축적 측면에서 평면과 입면이 정해진 후 구조설계자가 사용성과 안전성을 만족시킬 수 있는 구조시스템과 부재 크기를 선택하게 된다. 그러므로 건물의 평면과 입면이 정해지면 구조설계자는 그에 맞는 구조시스템 대안들을 만들고 대안들의 효율성을 평가하고 최종 구조시스템을 결정짓게 된다. 이러한 구조시스템별 대안의 비교를 통해 합리적인 구조시스템을 결정하는 것은 중요한 의미를 갖지만 제안된 구조 시스템별 대안이 적절한 물량으로 설계되었는지는 재고해 보아야 할 필요가 있다. 본 논문에서 사용하는 변위 설계법은 재분배 기법을 기반으로 하고 있으며 재분배기법은 에너지 이론에 근거하여 부재 변위기여도 (Displacement Participation Factors)를 구하고 이를 구조정식화 문제로 치환하여 물량을 분배함으로써 변위를 제어하는 실용적인 방법이다. 이러한 재분배 기법을 이용한 변위설계법은 시스템별로 목표한 변위를 만족하는 적절한 물량을 산정하는 방법으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 중량 수정계수를 사용하여 주어진 시스템에서 목표 변위를 만족하는 적정 물량 결정에 적용 가능한 변위조절 설계법을 제안하고자 한다.

1.2. 연구 범위

* 연세대학교, 건축도시공학부 박사과정

** 정회원, 연세대학교, 건축도시공학부 부교수

본 연구에서는 선행연구^{(6),(7),(8),(9)}에서 제안된 정식화에 중량 수정계수를 도입하여 수정된 정식화를 제안하였으며 이를 변위조절 설계법에 적용하여 중량 수정계수를 고려한 변위조절설계법을 개발하였다. 제안된 방법은 중량 수정계수를 제약함수에 포함하여 재분배후 물량을 설계자가 임의로 조절할 수 있으므로, 주어진 구조시스템에 대해 목표 변위를 만족시키는 적절한 물량을 결정하는 방법으로 사용될 수 있다. 본 연구는 20층 강접-골조 RC 전단벽 구조물 예제를 대상으로 하였으며, 중량수정계수를 이용하여 재분배후 물량을 초기 물량의 80%, 90%, 100%, 110%, 120%로 수정했을 경우 변위조절설계 결과를 변위, 층간변위 및 물량의 측면에서 비교·분석하여 제안된 중량 수정계수를 이용한 변위조절설계법의 효율성을 검증하고자 한다.

2. 중량 수정계수를 포함한 정식화

재분배기법을 이용한 변위조절설계법에서 제어하고자 하는 건물 최상층의 변위는 부재 변위기여도의 합으로 표현되면, 부재 변위기여도는 구조해석 결과인 부재력을 이용하여 구해진다.⁽⁸⁾ 부재 변위기여도는 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 기여도를 나타내며, 이는 재분배량 결정을 위한 기준이 된다. 최적화 기법 적용을 위해서 목적함수와 제약함수가 설계변수로 표현이 되어야 한다. 선행 연구^{(6),(7),(8),(9)}에서 설계 변수는 부재 단면적이 사용되었으며, 목적함수는 구조물 최상층 변위(δ)를 최소화하는 것으로, 제약함수는 물량 분배 전·후의 물량이 변화없는 것으로 정식화하였다. 하지만 본 연구에서는 제약함수에 중량 수정계수를 도입하여 재분배후 구조물량을 설계자의 임의대로 조절할 수 있도록 정식화를 수정하였다. 아래는 강접-골조와 RC 전단벽 구조물에 적용될 수 있는 정식화이다.

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

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j = \alpha \left\{ \sum_{i=1}^{ms} \beta_i W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \beta_j W_j \right\} \quad (2)$$

$$\beta_L \leq \beta_j \leq \beta_U \quad j = 1, \dots, mc \quad (3)$$

여기서, β_i, β_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, mc 는 각각 강재와 콘크리트의 부재수를 나타낸다. 철근 콘크리트 전단벽 부재는 시공을 고려하여 재분배 후의 전단벽 두께에 부 구속(Side constraints)조건을 식 (3)과 같이 추가하였다. β_L, β_U 는 각각 철근 콘크리트 물량 수정계수의 상·하한치를 나타내며, n 은 콘크리트 물량을 강제 물량으로 치환하기 위한 콘크리트에 대한 강재의 탄성계수 비를 나타낸다. α 는 중량 수정계수로서 설계자가 임의로 재분배 후 구조물량을 지정해 줄 수 있다. 만약, α 를 0.9로 정하면 재분배 후 물량을 초기물량의 90%로 감소하면서 물량이 분배되어 진다. 위와 같은 제약 최소화 문제를 라그랑지 승수를 이용하여 무제약최소화 문제로 치환시킨 후 K-T 조건(Kuhn-Tucker Condition)을 이용하면, 물량 수정계수 β_i, β_j 가 식 (4), (5)와 같이 구해진다.

$$\beta_i = \alpha \sqrt{\frac{\delta_i}{W_i} \frac{\sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j}{\sum_{i=1}^{ms} \sqrt{\delta_i W_i} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \sqrt{n \delta_j W_j}}} \quad i = 1, \dots, ms \quad (4)$$

$$\beta_j = \alpha \sqrt{n \frac{\delta_j}{W_j} \frac{\sum_{i=1}^{ms} W_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} W_j}{\sum_{i=1}^{ms} \sqrt{\delta_i W_i} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{mc} \sqrt{n \delta_j W_j}}} \quad j = 1, \dots, mc \quad (5)$$

K-T 조건에 의해서 얻어진 물량 수정계수 β_i, β_j 를 식 (6), (7)과 같이 현재의 단면적(A_i^{mi})에 곱하여 부재 사이즈를 수정함(Resizing)으로서 물량을 재분배하게 된다.

$$A_i^{new} = A_i^{mi} \times \beta_i \quad (6)$$

$$A_j^{new} = A_j^{mi} \times \beta_j \quad (7)$$

3. 적용

본 20층 강접-골조 전단벽 구조물은 높이 80M, 밀면길이 36M이며, 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 전단벽으로 구성되어 있다. 초기 설계된 철골 부재의 종류와 전단벽의 두께는 표 1과 같으며 구조물 형상은 그림 8과 같다. 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 2400kgf/cm², 2.1x10⁶ kgf/cm² 이며, 철근의 항복강도는 4000kgf/cm² 이다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 분담면적을 8m로 가정하여 산정하여 건물에 +x, -x 방향으로 작용시켰다. 사하중과 활하중은 각각 보에 4000 kgf/m, 1600 kgf/m의 등분포 하중으로 가정하였다. 제어하고자하는 건물 최상층변위는 건물 높이의 0.2%(16cm)로 가정하였다. 본 예제는 AID-ASD 83의 하중 조합에 대한 강도조건을 만족한다. 그림 1은 20층 예제 구조물의 단면도를 나타내며, 그림 2는 강도설계 모듈과 결합된 변위조절설계 모델을 나타낸다.

3.1. 초기물량의 80%로 수정 (CASE 1)

초기에 결정된 부재와 하중에 의한 부재력을 이용하여 제안된 변위설계 모델로 구조물 최상층 변위를 예측하면, 변위는 11.73cm로 예측되며, 이는 상용 구조해석 소프트웨어에서 구해진 11.60cm와 거의 일치한다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 전체 물량이 초기 물량의 80%가 되도록 재분배하였다. 재분배후 예측변위는 11.33cm로서 20%의 물량 감소에도 불구하고 초기변위의 97%로 감소한다. 변위제어후 강도체크단계에서 물량이 다소 증가하여 초기 물량의 84%가 되며 이때 변위는 11.03cm로 초기변위의 94%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 물량으로 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 9.55cm로서 예측된 변위 11.03cm와는 15%의 오차를 보인다. 초기 모델에서 최대 층간변위는 0.75cm로 16층에서 발생하였으나, 변위조절설계 후에는 0.66cm로서 13층에서 발생하며, 이는 초기 최대 층간변위의 88%에 해당한다. 표 1은 재분배후 전체 물량을 초기 물량의 80%로 수정했을 경우, 변위조절설계 적용에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

표 1. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE I)

| | 초기 | 재분배후 | 강도체크후 | 재해석 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 전체물량(tonf) | 347.45 | 299.56 | 312.18 | 312.18 |
| 변위기여도(cm) | 11.73 | 11.33 | 11.03 | 9.70 |
| 상용 소프트웨어(cm) | 11.60 | - | - | 9.55 |

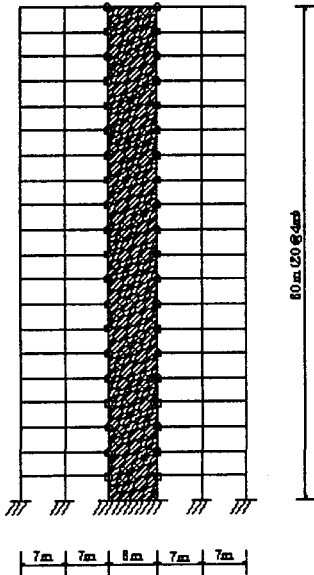


그림 1. 20층 예제 단면도

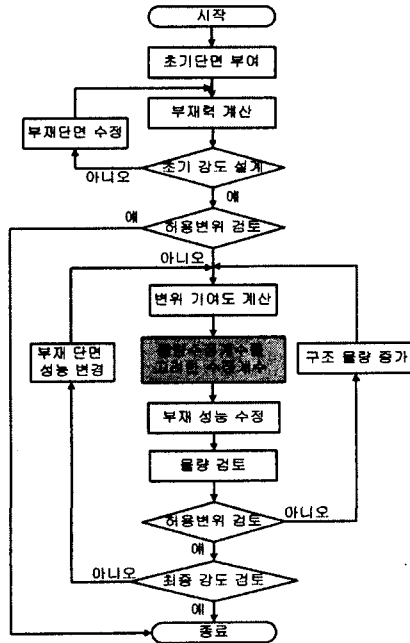


그림 2. 고층건물의 변위조절설계 모델

3.2. 초기물량의 90%로 수정 (CASE II)

초기에 모델에 대한 예측 변위는 CASE I과 동일하다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 전체 물량이 초기 물량의 90%가 되도록 재분배하였다. 재분배후 예측변위는 9.74cm로서 10% 물량 감소에도 불구하고 초기변위의 83%로 감소하였다. 변위제어후 강도체크단계에서 물량이 다소 증가하여 초기 물량의 93%가 되며 이때 변위는 9.52cm로 초기변위의 81%로 감소한다. 검증용 위해 수정된 물량으로 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 8.14cm로서 예측된 변위 9.52cm와는 17%의 오차를 보인다. 변위조절설계 후 최대 층간변위는 0.56cm 로서 13층에서 발생하며, 이는 초기 최대 층간변위의 75%에 해당한다. 표 2는 재분배후 전체 물량을 초기 물량의 90%로 수정했을 경우, 변위조절설계 적용에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

표 2. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE II)

| | 초기 | 재분배후 | 강도체크후 | 재해석 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 전체물량(tonf) | 347.45 | 337.00 | 347.75 | 347.75 |
| 변위기여도(cm) | 11.73 | 9.74 | 9.52 | 8.28 |
| 상용 소프트웨어(cm) | 11.60 | - | - | 8.14 |

3.3. 초기물량의 100%로 수정 (CASE III)

초기에 모델에 대한 예측 변위는 CASE I과 동일하다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 전체 물량이 초기 물량과 동일하게 재분배하였다. 재분배후 예측변위는 전체물량의 변화 없이 8.54cm로서 초기 변위의 73%로 감소하였다. 변위제어후 강도체크 단계에서 물량이 다소 증가하여 초기 물량의 102%가 되며 이때 변위는 8.39cm로 초기변위의 72%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 물량으로 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 7.16cm로서 예측된 변위 8.39cm와는 17%의 오차를 보인다. 변위조절설계 후 최대 층간변위는 0.49cm로서 13층에서 발생하며, 이는 초기 최대 층간변위의 65%에 해당한다. 표 3은 재분배후 전체 물량이 초기 물량과 동일할 경우, 변위조절설계에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

표 3. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE III)

| | 초기 | 재분배후 | 강도체크후 | 재해석 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 전체물량(tonf) | 347.45 | 374.45 | 383.57 | 383.57 |
| 변위기여도(cm) | 11.73 | 8.54 | 8.39 | 7.28 |
| 상용 소프트웨어(cm) | 11.60 | - | - | 7.16 |

3.4. 초기물량의 110%로 수정 (CASE IV)

초기에 모델에 대한 예측 변위는 CASE I과 동일하다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 전체 물량이 초기 물량의 110%가 되도록 재분배하였다. 재분배후 예측변위는 7.68cm로서 초기 변위의 66%로 감소하였다. 변위 제어후 강도체크 단계에서 물량이 다소 증가하여 초기 물량의 112%가 되며 이때 변위는 7.57cm로 초기변위의 65%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 물량으로 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 6.33cm로서 예측된 변위 7.57cm와는 20%의 오차를 보인다. 변위조절설계 후 최대 층간변위는 0.45cm로서 13층에서 발생하며, 이는 초기 최대 층간변위의 60% 해당한다. 표 4는 재분배후 전체 물량을 초기 물량의 110%로 수정함에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

표 4. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE IV)

| | 초기 | 재분배후 | 강도체크후 | 재해석 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| 전체물량(tonf) | 347.45 | 411.90 | 419.59 | 419.59 |
| 변위기여도(cm) | 11.73 | 7.68 | 7.57 | 6.45 |
| 상용 소프트웨어(cm) | 11.60 | - | - | 6.33 |

3.5. 초기물량의 120%로 수정 (CASE V)

초기에 모델에 대한 예측 변위는 CASE I과 동일하다. 중량 조절계수를 이용하여 재분배후 전체 물량이 초기 물량의 120%가 되도록 재분배하였다. 재분배후 예측변위는 7.05cm로서 초기 변위의 60%로 감소하였다. 변위 제어후 강도체크 단계에서 물량이 다소 증가하여 초기 물량의 122%가 되며 이때 변위는 6.97cm로 초기변위의 59%로 감소한다. 검증을 위해 수정된 물량으로 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석 하여 얻은 변위는 5.58cm로서 예측된 변위 6.97cm와는 25%의 오차를 보인다. 변위조절설계 후 최대 층간변위는 0.37cm로서 12층에서 발생하며, 이는 초기 최대 층간변위의 49%에 해당한다. 표 5는 재분배후 전체 물량을 초기 물

량의 120%로 수정했을 경우, 변위조절설계 적용에 따른 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

표 5. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE V)

| | 초기 | 재분배후 | 강도체크후 | 재해석 |
|--------------|--------|----------|--------|--------|
| 전체물량(tonf) | 347.45 | 449.3415 | 455.77 | 455.77 |
| 변위기여도(cm) | 11.73 | 7.05 | 6.97 | 5.69 |
| 상용 소프트웨어(cm) | 11.60 | - | - | 5.58 |

4. 결과 정리 및 분석

중량 수정계수를 이용하여 재분배후 물량을 초기물량의 80%, 90%, 100%, 110%, 120%로 조절했을 경우에 대해 변위조절설계를 적용하여 얻어진 부재성능을 이용하여 상용 구조해석 소프트웨어로 재해석한 변위, 층간 변위, 물량 및 변위와 물량 증감을 표 6과 같이 간단하게 정리하였다. 20층 강접-골조 전단벽 예제의 경우 물량의 증감율에 비해 변위의 변화량이 더 큰 것을 알 수 있다. 설계자는 다음과 같은 결과를 통해 각 CASE 중에서 가장 적절한 대안을 선택할 수 있으며, 또한 설계자가 목표하는 변위를 만족시키기 위해서 필요한 소요물량에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그림 6과 7은 각 CASE 별로 변위조절설계 적용에 따른 변위와 층간변위를 변화를 보여준다. 변위와 층간변위는 물량의 증가에 따라 점차적으로 감소함을 알 수 있다.

표 6. CASE별 결과 비교

| | 최상층변위(cm) | 최대층간변위(cm) | 물량(tonf) | 변위 증감비율 | 물량 증감비율 |
|----------|-----------|------------|----------|---------|---------|
| 초기설계 | 11.60 | 0.75 | 374.45 | - | - |
| CASE I | 9.55 | 0.66 | 312.18 | 0.823 | 0.834 |
| CASE II | 8.14 | 0.56 | 347.75 | 0.702 | 0.929 |
| CASE III | 7.16 | 0.49 | 383.57 | 0.617 | 1.024 |
| CASE IV | 6.33 | 0.45 | 419.59 | 0.546 | 1.121 |
| CASE V | 5.58 | 0.37 | 455.77 | 0.481 | 1.217 |

5. 결론

일반적인 고층건물 변위설계는 건물의 평면과 입면이 결정된 상태에서 사용성과 안전성을 만족시키는 적절한 시스템 및 부재 크기를 결정하게 되는데, 주어진 시스템별에서 목표 변위를 얻기 위해서는 어느 정도의 물량을 투입하는 것이 적절한지 알 수 없다. 본 연구에서는 주어진 시스템에서 변위와 적정 물량과의 관계 알 수 있도록 중량 수정계수를 고려한 변위조절 설계법을 개발하여, 이를 20층 강접-골조 전단벽 구조물의 변위 설계에 적용하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 중량 수정계수를 이용한 변위조절설계법은 고층건물 변위설계에 효과적으로 적용 될 수 가 있었다.
- 2) 중량 수정계수를 고려한 변위조절설계법은 물량의 증가 비율에 대한 변위 감소율이 더 큰 것을 알 수 있었다.
- 3) 중량 수정계수를 고려한 변위조절설계법을 통해 얻어진 대안(CASE)의 평가를 통해 적절한 설계안을 결정할 수 있었다.

이상과 같은 결과에서 중량 수정계수를 고려한 변위조절설계법은 설계안 평가에 적용 가능하며 또한, 목표 변위를 만족시키기 위한 적절 물량에 대한 가이드라인에 대한 정보를 제공할 수도 있다.

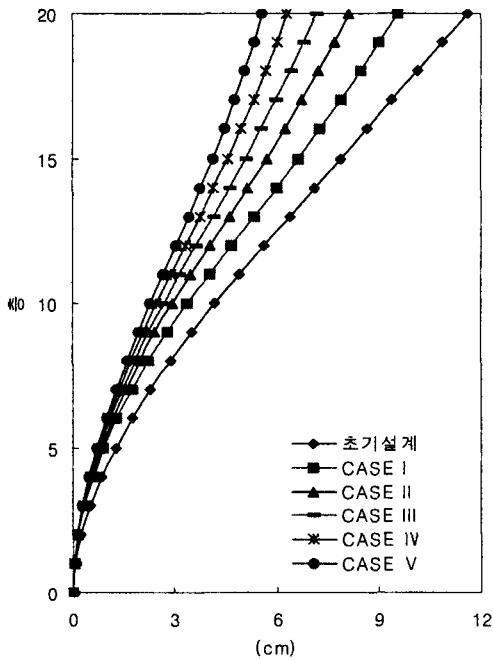


그림 3. 20층 예제 변위

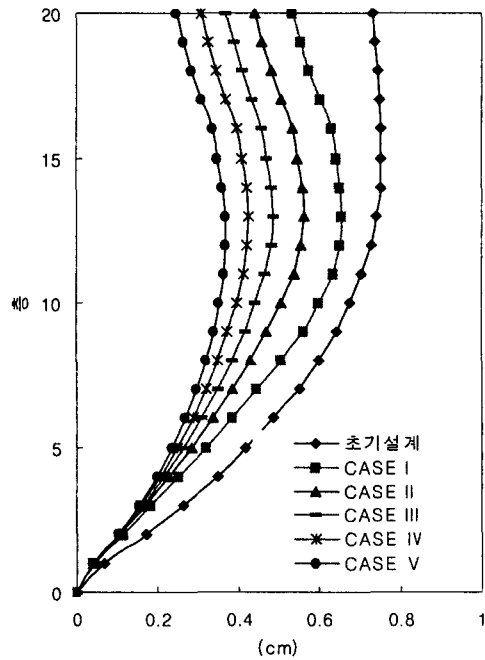


그림 4. 20층 예제 층간변위

감사의 글

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

참고 문헌

1. 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.
2. Chan, C. M., Grierson D.E., Sherbourne A. N. 1995. "Automatic optimal design of tall steel building frameworks", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(5), 838-847
3. Chan, C. M. Optimal lateral stiffness design of tall buildings of mixed steel and concrete construction. The Structural Design of Tall Buildings, 10: 155-177.
4. Panagiotis A. Makris, Christopher G. Probatidis. 2002. Weight minimization of displacement-constrained struss structures using a strain energy criterion, Computer Methods in Applied Mechanics and

Engineering, 191: 2159-2177

5. 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.

6. 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.

7. 서지현, 박효선 "재분배기법을 이용한 고층 구조물의 수평변위 설계법", 대한 건축학회 논문집, 제17권 제9호, 2001, pp3-80.

8. 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.

9. 서지현, 박효선 "실용적인 철골 프레임-전단벽 시스템의 변위조절법 개발", 한국 강구조학회 학술발표대회 논문집, 2003, pp578-583.