

# 재분배 기법 적용에 따른 모멘트 저항골조의 비선형 특성 평가

## Evaluation of inelastic performance of moment resisting steel frames designed by resizing algorithms

서 지 현<sup>1†</sup> · 권 봉 근<sup>2)</sup> · 박 효 선<sup>3)</sup>  
Seo, Ji Hyun · Kwon, Bong kwon · Park, Hyo Seon

요 약 : 최근 전통적인 구조 최적화 알고리즘의 단점을 극복하기 위해서 부재 변위기여도를 이용하여 부재 사이즈를 조절함으로써 건물의 변위를 만족시키는 재분배기법이 실용적인 고층 건물 변위설계법으로 인식되고 있다. 재분배 기법을 이용한 변위 설계법은 변위에 효과적인 부재는 물량을 증가시키고, 변위제어에 효과적이지 못한 부재의 물량은 감소시키는 방법으로 변위를 제어한다. 기존 연구에서 재분배 기법은 동적 변위기여도에 근거하여 지진하중을 받는 철골 구조물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있었다. 기존의 연구에서 재분배 기법은 정하중과 지진하중을 받는 고층 건물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있었으나, 재분배 기법으로 설계된 구조물의 비선형 성능에 대한 평가는 이루어지지 못했다. 본 연구에서는 변위 제어 뿐 만 아니라 비선형 특성을 함께 개선할 수 있는 재분배 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서, 재분배 기법의 비선형 특성 평가 모델을 개발하고, 이를 구조 시스템 중에서 가장 단순한 형태인 철골 모멘트 저항 골조 예제에 적용하여 철골 모멘트 저항 골조에 대한 재분배 기법의 비선형 특성을 평가하였다.

ABSTRACT : In recent years, to overcome drawbacks related to the application of classical structural optimization algorithms, various drift design methods based on factors of member displacement participation factors have been developed to size members if they satisfy stiffness criteria. In particular, a resizing algorithm based on dynamic displacement participation factors from the response spectrum analysis has been applied in the drift design of steel structures subjected to seismic lateral forces. In this approach, active members are selected for displacement control based on the displacement participation factors. A certain portion of structural material in the non-active members may be taken out and added to the active members for the drift control. The resizing algorithm can be practically and effectively applied to drift design of high-rise buildings however, the inelastic behavior of the resizing algorithm has not been evaluated yet. To develop the resizing algorithm considering the performance of nonlinearity as well as elastic stiffness, the evaluation model of resizing algorithms is developed and applied to the examples of moment-resisting steel frame, which is one of the simplest structural systems. The inelastic behavior of moment-resisting steel frame designed by the resizing algorithm is also discussed.

핵심 용어 : 변위설계, 재분배기법, 구조 최적화, Push-over, 비선형.

KEYWORDS : Drift design, Resizing algorithm, Structural optimization, Push-over, Non-linearity.

### 1. 서론

고층건물의 구조 설계는 스키메틱 설계, 구조 해석, 강도 설계 및 강성 설계로 구성되어 있다. 고층 건물은 높이가 증가하면 할수록 강도 설계 보다 구조물의 최상층 변위나 층간변위와 같은 강성 설계에 의해서 구조설계가 결정되게 된다. 특히, 최

종 설계 단계에서 변위는 고층건물의 횡하중 저항 시스템이나 구조 물량을 결정짓는 중요한 요소가 되고 있다. 그러나 이제 까지 고층 건물의 강성설계는 대부분 설계자의 경험과 직관에 의존하고 있다. 이러한 설계자의 경험과 직관에 의존한 방법은 이론적 근거가 부족할 뿐만 아니라 설계자의 능력에 따라 구조 설계 품질의 차가 크므로 고층건물의 변위 설계는 소수의 해외

1) 교신저자, 정회원, 연세대학교, 건축공학과, 박사후과정  
(Tel. 02-2123-2794, Fax. 02-365-4668, E-mail : seojh@yonsei.ac.kr)  
2) 연세대학교, 정회원, 건축공학과, 석사(archineer@yonsei.ac.kr)  
3) 연세대학교, 정회원, 건축공학과, 부교수(hspark@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

선진 구조 사무소나 엔지니어링회사가 독점하고 있다.

설계자의 능력에 상관없이 고층 건물의 강성 설계를 효율적으로 수행하기 위하여 수학적 방법에 근거를 둔 최적화 기법이 이용되고 있다. 고층 건물의 변위를 제어하기 위한 최적화 기법으로 민감도 해석법이 많이 사용되고 있으나, 민감도 계수의 계산에 요구되는 과도한 계산량으로 인해 고층 건물 설계 적용에는 아직 한계가 있다. 최근에는 유전자 알고리즘(Genetic algorithms)과 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘(Simulated annealing algorithms) 등과 같은 Zeroth-order 알고리즘이 다양한 구조 최적화 문제에 적용되고 있다. 이러한 Zeroth-order 알고리즘은 구조 민감도 계수의 계산이 필요치 않으며 개념이 비교적 간단하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 이러한 알고리즘은 국부 최소화에 빠질 수 있으며 수 많은 구조 해석을 필요로 하기 때문에 실무적용에는 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 1990년대 초 Baker, Forrest-Brown and Samali, and Charney 등이 단위하중법을 이용한 재분배 기법을 소개하였다. 그 후 Park과 Park(1997)은 변위기여도를 구조 최적화 문제로 정식화하여 구조물량을 분배함으로써 정적하중을 받는 철골 구조물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있는 재분배 기법을 개발하였다. 또한 Park과 Seo(2000)는 정적 하중을 받는 강접 골조 전단벽 구조물에 적용할 수 있는 재분배 기법을 개발하였으며, 재분배 기법의 실용성과 적용성을 높이기 위한 연구를 진행하였다. 또, 지진하중을 받는 구조물의 변위 설계를 위해 동적 변위기여도를 정의하고 이를 이용하여 동적 재분배 기법을 개발하여 지진하중을 받는 고층건물의 변위를 효과적으로 제어하였다. 지진하중을 대상으로 개발된 재분배 기법은 탄성범위에서는 효과적으로 적용할 수 있는 방법이라는 것이 증명되었지만, 아직 비선형 특성에 대한 평가는 이루어 지지 못했다. 그러므로 지진하중을 대상으로 개발된 재분배 기법의 비선형 특성을 평가할 필요가 있다.

이제까지의 대부분의 실무 고층 건물 구조설계는 탄성해석을 기반으로 지진하중에 대한 설계가 이루어 졌다. 기존 내진설계 철학은 약한 지진에 대해서는 구조물을 보수하여 사용하고, 강한 지진에 대해서는 인명 안전을 확보한다는 개념으로 이제까지 발생한 대부분의 지진에 대해서 이러한 설계 개념이 충실히 지켜진 것으로 여겨졌다. 하지만 Northridge 지진이나 고베지진 등 근래 여러 나라에서 발생한 지진피해를 통해, 기존의 내진설계 철학은 잘 만족되고 있었으나, 사용성에 대한 성능을 제대로 보장할 수 없었으므로 인해 지진발생 후 상당한 경제적 부담을 피할 수 없었다. 이에 따라 미국, 일본 등 세계각지에서 많은 연구자들이 변위기반 설계에 바탕을 둔 성능 기반 내진설계법(Performance-Based Seismic Design)이 제시되었으며 최근 국내외 규준에 반영되고 있는 실정이다.

최근 고층건물 설계에서도 이러한 내진성능 기반 설계법의 개념이 도입되면서, 강도, 변위 등과 같은 탄성에 대한 설계뿐만 아니라, 에너지 흡수능력, 연성도와 같은 비선형 능력 확보에 대한 요구가 확대되고 있다. 하지만, 성능 기반 내진 설계법은 구조물의 비탄성 해석을 필요로 하고 있으며 고층건물의 부재수를 고려할 때, 경험이나 직관에 의존한 설계로는 구조설계의 효율성이나 경제성을 기대하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 성능 기반 내진설계법과 최적화기법을 결합한 연구들이 진행되고 있다. S. Ganzerli(2000)는 1층 1경간 포탈 프레임에 대상으로 성능기반 설계에 근거한 최적화 기법을 소개하였으며, Kwon(2005)등은 다양한 성능 목표를 만족하는 성능기반 최적 내진설계법을 개발하였다. Chan(2002) 등은 철근 콘크리트 구조물을 대상으로 Push-over 해석을 이용한 최적 비선형 변위 제어 설계법을 개발하였다. 이 논문에서는 탄성결과를 이용하여 변위 제약을 만족하는 최적의 부재의 단면 크기를 결정한 후, push-over 해석결과를 이용하여서는 충분한 연성을 확보하도록 철근비를 조절하는 2 단계의 비선형 최적화기법을 소개하였다. 하지만, 이러한 방법은 여전히 반복적인 탄성, 비탄성 해석에 요구되는 과도한 계산량으로 인해 현실적인 고층 구조설계 적용에는 아직 한계가 있다.

이처럼 고층건물의 비선형 능력 확보에 대한 요구가 증가하는 시점에서, 탄성범위에서 변위를 효과적으로 제어할 수 있었던 재분배 기법의 비선형 성능에 대한 의문을 가지게 된다. 이제까지 연구된 재분배 기법은 탄성 범위에서 변위제어 알고리즘 자체의 효율성을 높이는 방법과 실용성을 높이기 위한 방법이 주로 연구되었으며, 재분배 기법의 효율성 역시 변위, 층간 변위, 응력 등과 같은 탄성과 관련된 항목에 대해서 이루어 졌다. 그러나, 재분배 기법의 비선형 특성에 대한 평가는 아직 이루어지지 못했다.

그러므로 본 연구에서는 재분배 기법의 비선형 성능을 평가 모델 개발을 위해 Drain-2DX의 정적 비선형 해석(Push-over analysis)과 FEMA 273에서 제시하는 비선형 평가 기준을 이용하였다. 본 연구에서는 SAC에서 벤치마크 모델로 사용한 3층, 9층 모멘트 저항 골조 예제를 대상으로 초기 구조물과 재분배 기법에 의해 설계 구조물 제안된 재분배 기법에 의해 설계된 구조물에 각각 개발된 비선형 특성 평가 모델을 적용하여 비선형 특성을 비교 평가함으로써 재분배 기법의 비선형 특성을 평가하였다.

## 2. 변위 설계법

재분배 기법을 이용한 고층건물 변위조절 설계법은 초기 강도설계, 재분배 기법을 이용한 변위설계 및 최종 강도설계로 이루어진다. 본 연구에서 제안하는 재분배 기법을 이용한 변위

설계법은 초기 강도 설계를 만족하는 구조물을 대상으로 재분배 기법을 적용하여 변위를 제어하고, 다시 강도설계를 수행함으로써 강성 설계와 강도설계를 만족하는 효율적인 구조물을 얻을 수 있다. 재분배 기법을 이용한 변위조절 설계법과 비선형 특성 평가는 그림 1과 같이 구성되어 있다.

### 2. 1 변위기여도

재분배 기법은 가상일의 원리에 근거하여 부재에 축적되는 변형 에너지를 이용하여 물량 분배량을 결정하게 된다. 재분배 기법에서 물량 분배의 근거가 되는 동적 변위기여도는 단위 하중법을 이용하여 식 (1)과 구해 질 수 있다.

$$\delta = \sum_{i=1}^m \zeta_i = \sum_{i=1}^m \left\{ \int_0^l \frac{N_i^S N_i^U}{EA_i} dx + \alpha \int_0^l \frac{V_i^S V_i^U}{GA_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^S M_i^U}{EI_i} dx + \int_0^l \frac{T_i^S T_i^U}{GI_{pi}} dx \right\} \quad (1)$$

여기서,  $\delta$  와  $\zeta_i$ 는 제어되어야 할 구조물 최상층 변위와  $i$ 번째 부재의 동적 변위기여도를 나타낸다.  $N_i, V_i, M_i, T_i$ 는 지진하중과 단위하중에 의한 부재력을 나타내며, 각각 상첨자  $S, U$ 로 구분된다.  $E, G$ 는 탄성계수와 전단탄성계수를 나타내며  $A_i, I_i, I_{pi}$ 는 각각  $i$ 번째 부재의 단면적, 단면 2차 모멘트, 극 단면 2차 모멘트를 나타내며,  $m$ 은 전체 부재수를 나타낸다. 여기서, 동적 변위기여도를 얻기 위한 부재력은 응답 스펙트럼 해석(Response spectrum analysis)에서 얻어진다. 응답 스펙트럼 해석법은 구조물의 최대 반응을 간단하게 구할 수 있는 방법으로서 실무에서 많이 사용되고 있는 동해석법이다. 식 (1)에 의해 동적 변위기여도가 계산되며, 각 부재의 동적 변위기여도는 최상층 변위에 대해서 각 부재의 기여도를 의미하므로 변위를 제어하는데 효과적인 부재(Active member)를 찾을 수가 있다. 변위기여도에 근거하여 각 부재의 물량을 증가시키거나 감소시킴으로써 변위를 제어하게 된다. 동적 변위기여도를 통해서 변위 제어에 효과적인 부재와 그렇지 않은 부재를 구분할 수는 있지만, 변위 제어를 위해서 얼마만큼의 물량을 증감시켜야 할지는 알 수 없다. 이러한 물량의 증가 및 감소량은 다음의 정식화를 통해서 결정된다.

### 2. 2 구조 정식화

식 (1)에서 구해진 동적 변위기여도는 다음과 같은 구조 정식화로 표현된다. 본 연구에서는 단면 수정 계수( $\beta_i$ )를 도입하여 목적함수는 구조물 최상층 변위( $\delta$ )를 최소화하는 것으로 한다. 이때 구조물 최상층 변위는 모든 부재의 동적 변위기여도( $\zeta_i$ )를 더한 값이며, 각 부재의 동적 변위기여도는 부재 단면의 변화에 반비례하는 것으로 가정한다. 제약함수는 재분배 전·후의 물량이 변화 없는 것으로 한다.

$$\text{Minimize } \delta = \sum_{i=1}^m \frac{\zeta_i}{\beta_i} \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i = \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i \quad (3)$$

여기서,  $\rho_i, A_i, L_i$ 는 각각  $i$ 번째 부재의 밀도, 단면적, 길이를 나타낸다.

식 (2), (3)은 라그랑지 승수( $\lambda_L$ )를 도입하여 무제약 최소화 문제로 치환될 수 있다.

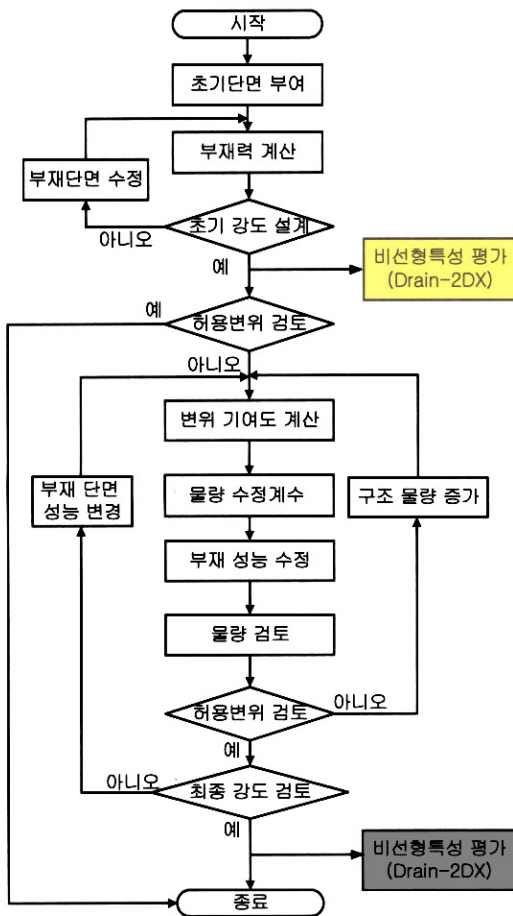


그림 1. 비선형 특성 평가 모델

$$\delta_i = \sum_{i=1}^m \frac{\xi_i}{\beta_i} + \lambda_L \left( \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i - \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i \right) \quad (4)$$

식 (4)와 같은 가 목적함수(δ<sub>i</sub>)의 최적 해를 찾기 위해 β<sub>i</sub>, λ<sub>L</sub>에 대해서 미분한 후 영(zero)으로 둔다.

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \beta_i} = -\frac{\xi_i}{\beta_i^2} + \lambda_L \rho_i A_i L_i = 0 \quad i = 1, m \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \lambda_L} = \sum_{i=1}^m \beta_i \rho_i A_i L_i - \sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i = 0 \quad (6)$$

식 (5), (6)을 정리하면, 단면 수정계수 β<sub>i</sub>는 식 (7)과 같이 구해진다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\xi_i}{\rho_i A_i L_i}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i A_i L_i}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\xi_i \rho_i A_i L_i}} \quad (7)$$

식 (7)에 얻어진 단면 수정계수에 의해서 전체 구조물량의 변화없이 초기 설계된 부재 성능이 수정(Resizing)된다.

### 3. 예제 적용

#### 3.1 3층 4경간 예제

재분배 기법의 결과 및 비선형 성능의 평가를 위해서 선행 연구(Hassan and Grierson, 2002; Gupta and Krawinkler, 2000)에서 사용한 그림 2와 같은 예제를 선택하였다. 이 예제는 3층 4경간 철골 강접 골조 프레임으로서 1차 주기는 1.03초이다. 총 27개의 부재가 5개의 그룹으로 나뉘어져 있으며 초기 모델은 IBC 2000 지진하중을 만족하도록 설계되었다. (표 1 참조). 지진하중은 IBC 2000(site class D, S<sub>v</sub>=1.0, S<sub>1</sub>=0.5)을 따른 응답 스펙트럼 해석법이 사용되었다. 기둥과 보의 공칭강도는 248MPa이며, 일반층과 지붕층의 중력하중은 그림 2와 같다.

##### 3.1.1 동적 재분배 기법 결과

초기 설계에 의해 결정된 부재 종류와 재분배 기법 적용에 따른 부재 그룹별 수정계수와 수정된 부재의 종류는 표 1과 같다. 각 부재의 동적 변위기여도를 계산하여 얻은 구조물 최상층 변위는 14.30cm이다. 재분배후 기둥의 물량은 감소

하며 거더의 물량은 증가하는 경향을 보인다. 표 1에서 표현된 수정계수를 이용하여 설계 변수로 사용된 부재의 단면적을 수정하는 방법으로 물량을 재분배 한다. 그룹 물량과 변위기여도는 그림 3, 4와 같이 표현된다. 그림 3과 4에서 재분배 후의 1번 기둥 그룹과 3번 거더 그룹은 변위기여도가 물량에 반비례하지 않은 결과를 나타내는데 수정된 부재 단면적에서 회귀분석에 의해 다른 단면 성능을 계산하는데서 발생하는 오차이다. 본 연구에서 단면적과 다른 단면 성능과의 관계는 상용 부재를 대상으로 한 회귀분석을 이용하여 미리 결정하였다. 재분배 후 변위는 13.90cm 로서 초기 변위의 97% 수준으로 감소하며, 모든 부재는 강도 조건을 만족한다. 본 연구에서는 연속형 부재 단면적을 설계 변수로 사용하였으므로, 최종 부재의 성능은 AISC의 데이터베이스에서 W형대의 단면을 선택하였다. AISC의 단면 선택은 재분배 기법에서 얻은 부재 단면 성능(단면적) 보다 크면서 가장 가까운 단면을 선택하였다. 재분배 기법의 결과를 확인하기 위해 상용 소프트웨어로 재분배기법에 의해 설계된 구조물을 재해석한 변위는 12.79cm로 감소한다. 재분배 후 예측된 변위 13.90cm와 재해석에서 얻어진 변위 12.79cm와는 약 9%의 오차를 보인다. 이러한 오차는 물량 재분배에 따른 단면성능의 변화와 이에 따른 응력 재분배의 영향과 연속형 부재 단면 성능에서 이산형 단면 성능으로 전환하는 과정에서 발생한 것으로 분석된다. 응답 스펙트럼 해석법에서 초기 모델의 최대 층간 변위는 5.22cm이었으나 재분배 기법을 적용한 후 최대 층간 변위는 3.94cm로 초기값의 75% 수준으로 감소한다. 재분배 적용 전·후의 구조물의 고유주기는 표 2에 정리되어 있다. 1, 2차 고유주기는 감소하고 3차 고유주기는 증가하는 경향을 보인다.

표 1. 재분배 기법 적용 전·후의 부재 종류

부재종류	그룹번호	초기 설계	수정계수	재분배후
외부 기둥	1	W14×257	0.975	W14×257
내부 기둥	2	W14×311	0.836	W14×283
1층 거더	3	W33×118	1.157	W36×150
2층 거더	4	W30×116	1.239	W33×152
3층 거더	5	W24×68	1.104	W24×76

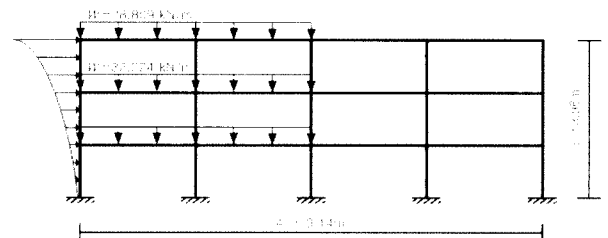


그림 2. 3층 4경간 철골 강접 골조

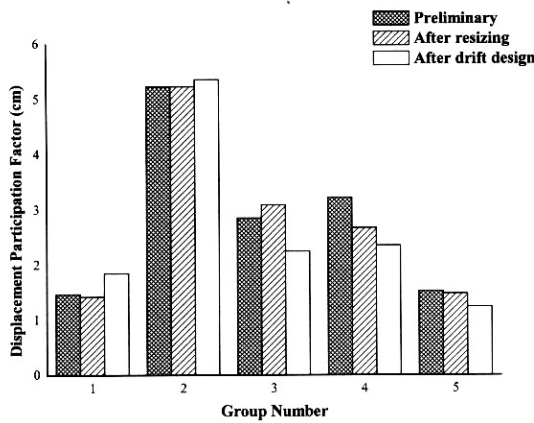


그림 3. 변위기여도의 변화

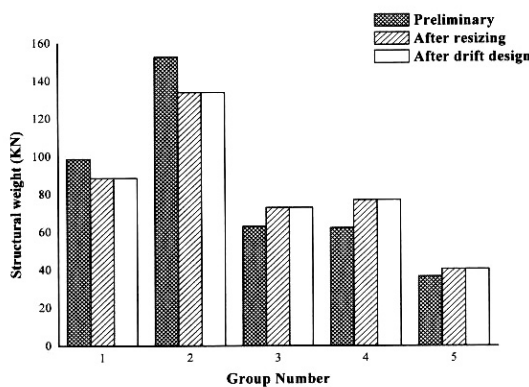


그림 4. 구조 물량의 변화

3.1.2 비선형 성능 평가

본 연구에서는 재분배 기법의 비선형 성능을 평가하기 위해서 초기 설계된 구조물과 재분배 기법에 의해 설계된 구조물에 대해 push-over 해석을 실시하였다. 구조물의 강성이 저하되는 것을 보기 위해 중력하중  $\omega$ 가 작용한 상태에서 수평하중을 점차적으로 증가시키면서 그림 5와 같은 push-over 곡선을 얻었다. push-over 해석은 Drain-2DX를 이용하였으며 기둥과 보의 element type 02를 사용하였다. 기둥과 보의 재료 모델은 완전 탄소성 모델(Elastic-perfectly-plastic model)을 사용하였다. 횡력은 구조물 최상층 변위가 FEMA 273에서 제안하는 목표 변위에 도달할 때까지 증가시켰으며, 구조물 최상층의 변위와 각 층의 층간변위가 FEMA 273에 제시된 다양한 성능 레벨을 만족하는지 확인하였다. FEMA 273에서 Immediate-Occupancy (I.O.), Life-Safety (L.S.), 및 Collapse-Prevention (C.P.)에 대한 목표 변위는 각각 0.7%, 2.5%, 5%로 제시되어 있으며, 본 연구에서도 구조물 최상층 변위가 FEMA 273에서 제안

한 성능 목표 변위에 도달한 경우와 각 층에서 성능 목표 변위를 초과했을 때를 그림 5에 표현하였다. 또한, 최초 항복 점과 횡 강성을 표 3과 같이 정리하였다.

그림 4에서 수직 점선은 구조물 최상층 변위가 FEMA 273에서 제안한 성능 목표 변위에 도달한 시점을 나타낸다. 또한, 각 층의 층간 변위가 FEMA 273에서 제안한 성능 목표 층간 변위를 초과하는 시점을 모니터링하여 push-over 곡선 위에 삼각형 모양으로 표시하였다. 재분배 기법 적용에 따라 그림 5와 표 3을 통해 재분배 기법 적용에 따라 초기 강성이 증가한 것을 알 수 있으며 또한 첫 번째 소성힌지 발생 시점도 지연된 것을 알 수 있다. 초기 강성의 증가는 재분배 기법 적용에 따라 변위가 감소하는 것과 같은 맥락에서 이해 될 수 있다. 구조물 최상층 변위를 기준으로, 재분배기법 적용 후의 모델이 I.O. 성능 레벨에서 최초 소성힌지의 발생 시점은 지연되며 소성힌지 발생 수도 줄어들며, 초기 강성은 19% 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, L.S. 및 C.P. 성능 레벨에서 초기 모델은 주로 거더에서 소성힌지가 발생하는 반면, 재분배 기법 적용 후에는 거더와 기둥에서 소성힌지가 발생하였다. 이는 재분배 기법 적용에 따라 물량이 기둥에서 거더로 분배되었기 때문인 것으로 분석된다.

그림 7은 push-over 해석에 따른 소성힌지의 분포를 나타낸다. 초기 모델에 비해 변위설계 후에는 저층부 내부 기둥에서 소성힌지가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 물량 재분배시 저층부 기둥의 물량이 감소한 것과 같은 의미에서 해석될 수 있다. 각 층 별로 층간변위를 모니터링하여 I.O. L.S. 및 C.P.성능 레벨을 초과하는 시점을 정리하면, 재분배 기법을 적용한 모델은 초기 모델에 비해 I.O. L.S. 및 C.P.성능 레벨에서 최상층 변위 기준으로 각각 102.4%, 81.8%, 73.9% 수준에서 층간 변위를 위배하는 것으로 나타난다. 즉, 층간 변위 측면에서 재분배 기법 적용에 따라 I.O. 성능 레벨을 위배하는 시점은 지연되지만, L.S.와 C.P. 성능 레벨을 위배하는 시점은 더 빨라짐을 알 수 있다. 그림 4는 변위 설계 전후의 모드 형상을 나타내는 것으로서 변위설계 적용에 따른 모드 형상의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 구조물 최상층 변위가 FEMA 273에서 제시한 성능 목표 레벨에 도달했을 때의 각 층의 층간 변위를 나타낸다. 변위설계법 적용에 따라 층간 변위는 I.O. 성능 레벨에서는 감소하고 L.S. 및 C.P. 성능 레벨에서는 증가한 것을 알 수 있다. 표 4는 push-over 해석으로 얻어진 최상층 변위와 밀면 전단력 및 연성도 등을 보여준다. 변위설계기법 적용에 따라 구조물의 연성(Ductility demand)은 L.S. 및 C.P. 성능 레벨에서 더 작은 값을 가짐으로서, 구조물의 연성도가 더 작아진 것을 알 수 있다.

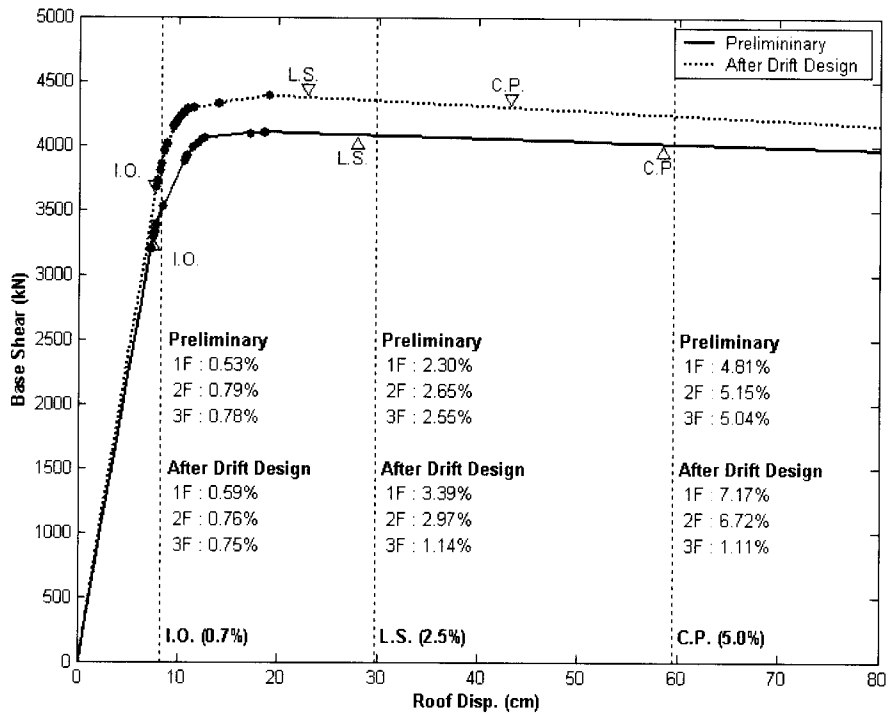
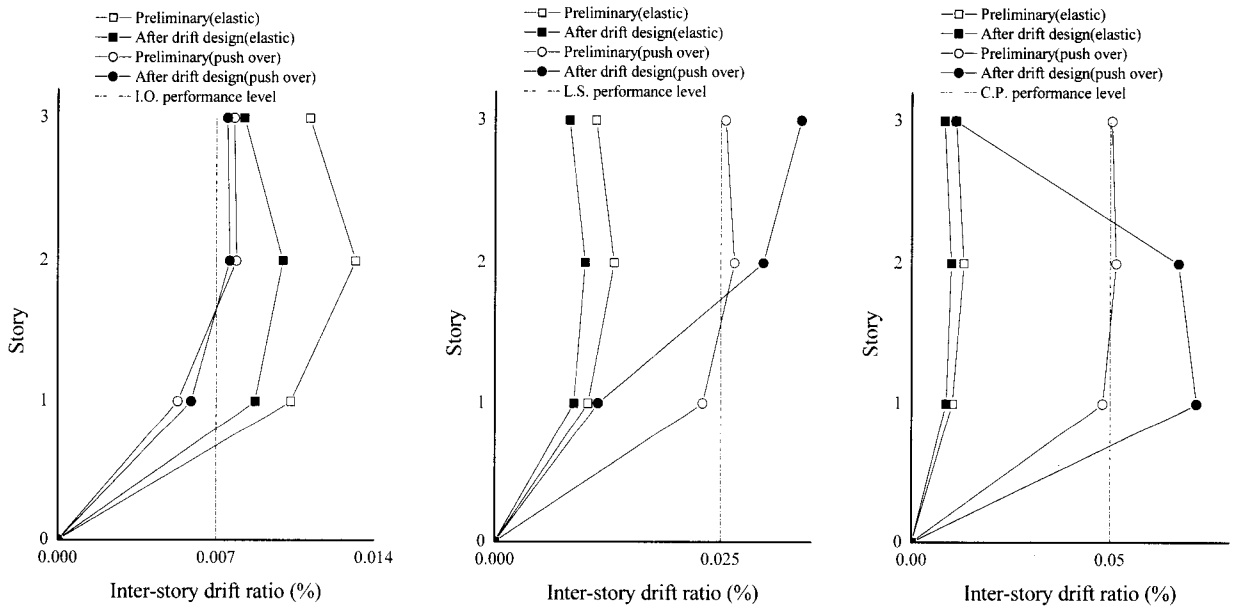


그림 5. Push-over curve (3층 4경간)



(a). I. O. 성능 레벨

(b). L. S. 성능 레벨

(c). C. P. 성능 레벨

그림 6. 변위설계 적용 전·후의 층간 변위의 분포 (3층 4경간)

표 2. 변위 설계 적용 전·후의 고유주기(3층 4경간, 단위 : 초)

Mode	Preliminary	After drift design
1st	1.025	0.958
2nd	0.346	0.340
3rd	0.191	0.196

표 3. 최초 항복점과 횡 강성(3층 4경간)

구분	Initial yielding point (cm, kN)	Lateral Stiffness (kN/cm)	Cumulative Energy (kN · cm)
Preliminary	(7.23, 3202)	442.88	217670.39
After drift design	(7.71, 4062)	526.85	167094.56

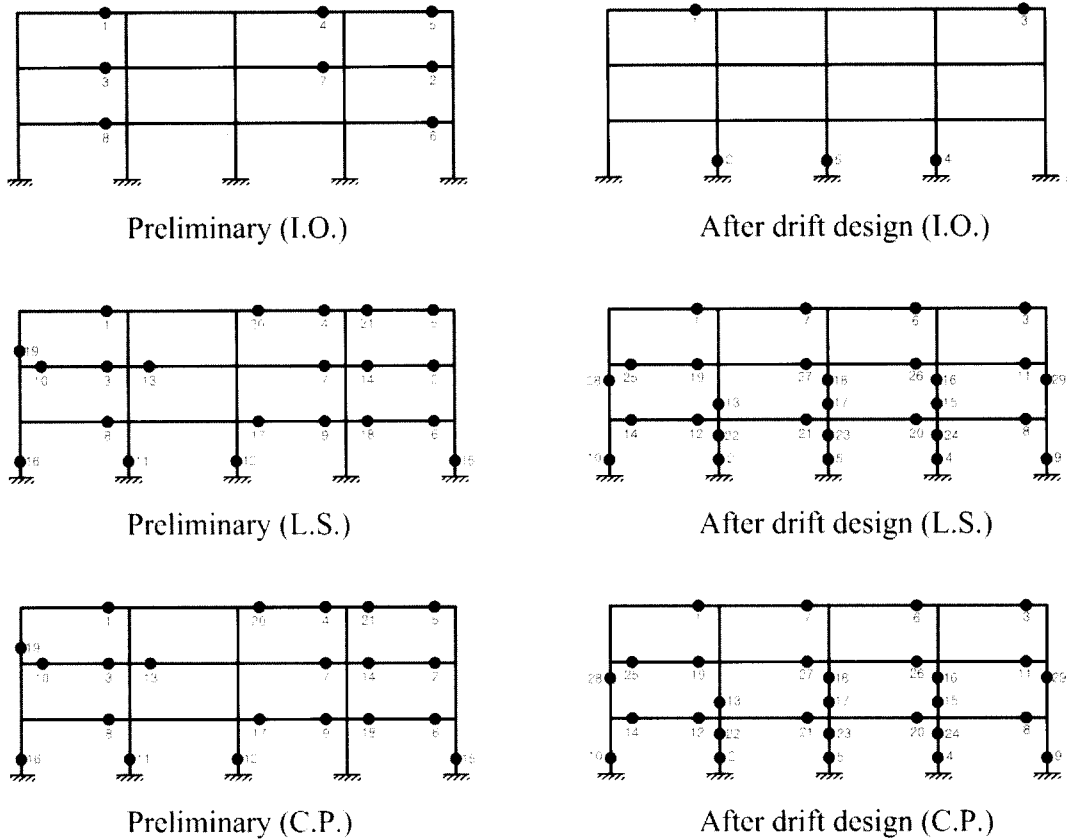


그림 7. 소성힌지의 분포 (3층 4경간)

표 4. Push-over 해석 결과 (3층 4경간)

Division	Performance level	Roof displacement (cm)	Ductility demand ( $\delta_{roof} / \delta_{yield}$ )	Base Shear (V, kN)	Spectral acceleration ( $S_a^{analysis} = Vg/W$ )
Preliminary	Operational	7.23	1.000	3200.939	0.222 g
	Immediate Occupancy	8.44	1.167	3522.101	0.244 g
	Life Safety	30.48	4.216	4073.680	0.282 g
	Collapse Prevention	58.42	8.081	4010.070	0.278 g
After drift design	Operational	7.71	1.000	4062.115	0.281 g
	Immediate Occupancy	8.35	1.083	4327.673	0.300 g
	Life Safety	30.48	3.953	4875.249	0.337 g
	Collapse Prevention	59.69	7.740	4768.492	0.330 g

재분배 기법 적용에 따라 전단력은 Operational 단계와 I.O., L.S., 및 C.P. 성능 레벨에서 각각 27%, 23%, 20%, 19% 증가한다. 각 층의 층간 변위를 모니터링하여 층간 변위가 C.P. 성능 레벨에 도달했을 때 에너지 흡수능력을 비교하면, 재분배 기법 적용 후의 모델이 에너지 흡수능력이 초기 모델의 77%로 감소한다. 표 4에서  $\delta_{yield}$ (Operational performance level)는 구조물을 구성하는 부재중 최초의 소성힌지가 발생하는 시점에서의 변위를 나타낸다.

### 3.2 9층 5경간 예제

재분배 기법의 결과 및 비선형 성능의 평가를 위해서 선행 연구(Hassan and Grierson, 2002; Gupta and Krawinkler, 2000)에서 사용한 그림 8과 같은 예제를 선택하였다. 이 예제는 9층 5경간 철골 강접 골조 프레임으로서 1차 주기는 2.24초이다. 총 99개의 부재가 19개의 그룹으로 나뉘어져 있으며 초기 모델은 IBC 2000 지진하중을 만족하도록 설계되었다.(표 5 참조). 지진

하중은 IBC 2000(site class=D,  $S_s=1.0$ ,  $S_1=0.5$ )을 따른 응답 스펙트럼 해석법이 사용되었다. 기둥과 보의 공칭강도는 각각 248 MPa, 345 MPa이다. 일반층과 지붕층의 중력하중은 그림 8과 같다.

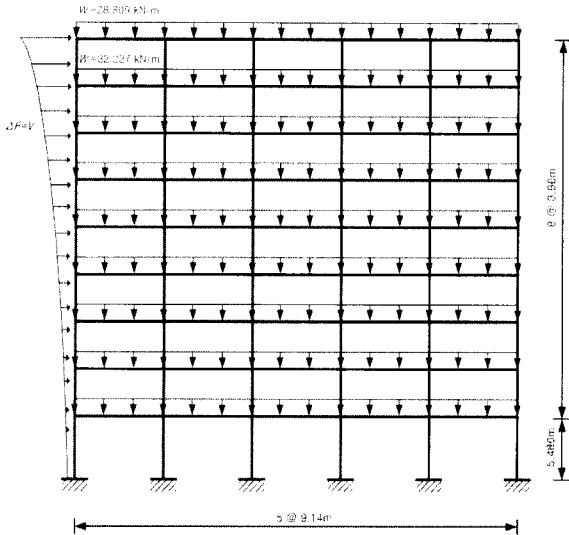


그림 8. 3층 4경간 철골 강접 골조

표 5. 재분배 기법 적용 전·후의 부재 종류

부재 종류	그룹 번호	층수	초기 설계	수정계수	재분배후
외부 기둥	1	1	W14×370	0.968	W14×370
	2	2-3	W14×370	0.630	W14×257
	3	4-5	W14×283	0.709	W12×210
	4	6-7	W14×257	0.719	W12×210
	5	8-9	W14×233	0.590	W12×210
내부 기둥	6	1	W14×500	0.975	W14×500
	7	2-3	W14×455	0.775	W14×370
	8	4-5	W14×370	0.908	W14×342
	9	6-7	W14×283	1.085	W14×311
거더	10	8-9	W14×257	0.951	W14×257
	11	1	W36×160	1.152	W36×194
	12	2	W36×160	1.099	W36×182
	13	3	W36×135	1.206	W36×170
	14	4	W36×135	1.178	W36×160
	15	5	W36×135	1.128	W33×169
	16	6	W36×135	1.123	W33×152
	17	7	W30×99	1.474	W33×152
	18	8	W27×84	1.559	W33×141
	19	9	W24×68	1.145	W24×84

3.2.1 동적 재분배 기법 결과

초기 설계에 의해 결정된 부재 종류와 재분배 기법 적용에 따른 그룹별 수정계수와 부재의 종류는 표 5와 같다. 각 부재의 동적 변위기여도를 계산하여 얻은 구조물 최상층 변위는 35.40 cm이다. 변위기여도에 근거하여 전체 구조물량의 변화없이 물량이 분배 하면 그림 9와 같이 재분배후 기둥의 물량은 감소하며 거더의 물량은 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 표 5에서 표현된 수정계수를 이용하여 부재의 단면적을 수정하는 방법으로 물량을 재분배 한다. 재분배 후 변위는 34.46 cm로서 초기 변위의 97% 수준으로 감소한다. 재분배 후 모든 부재는 강도 조건을 만족하므로 강도설계 단계에서는 물량이 증가하지 않는다. 그러나, 연속형 부재 단면적을 AISC의 데이터베이스에서 W 형태의 단면을 선택하는 과정에서 물량이 5% 증가하게 된다. AISC의 단면 선택은 재분배 기법에서 얻은 부재 단면 성능(단면적) 보다 크면서 가장 가까운 단면을 선택하였다. 재분배 기법의 결과를 확인하기 위해 상용 소프트웨어로 최종 설계된 구조물을 재 해석하면, 구조물 최상층 변위는 29.98 cm로 감소한다. 응답 스펙트럼 해석법에서 초기 모델의 최대 층간 변위는 4.92 cm 이었으나 재분배 기법을 적용한 후 최대 층간 변위는 4.83 cm 로 초기값의 98% 수준이 된다. 재분배 적용 전·후의 구조물의 고유주기는 표 6에 정리되어 있다. 재분배 기법 적용에 따라 고유 주기는 감소함을 알 수 있다.

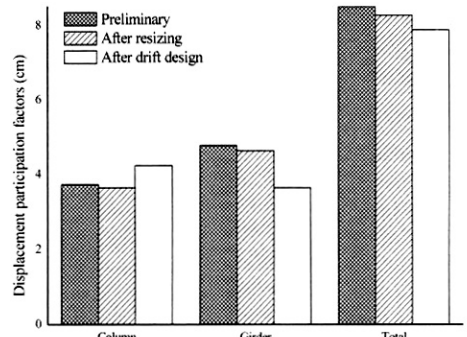


그림 9. 변위기여도의 변화 (9층 5경간)

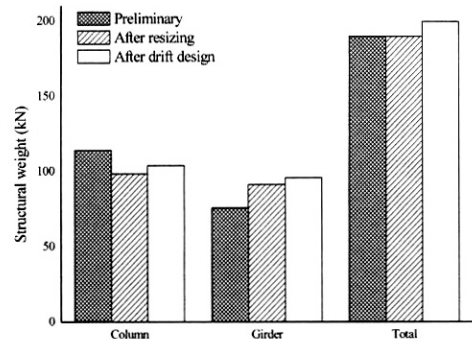


그림 10. 구조 물량의 변화 (9층 5경간)



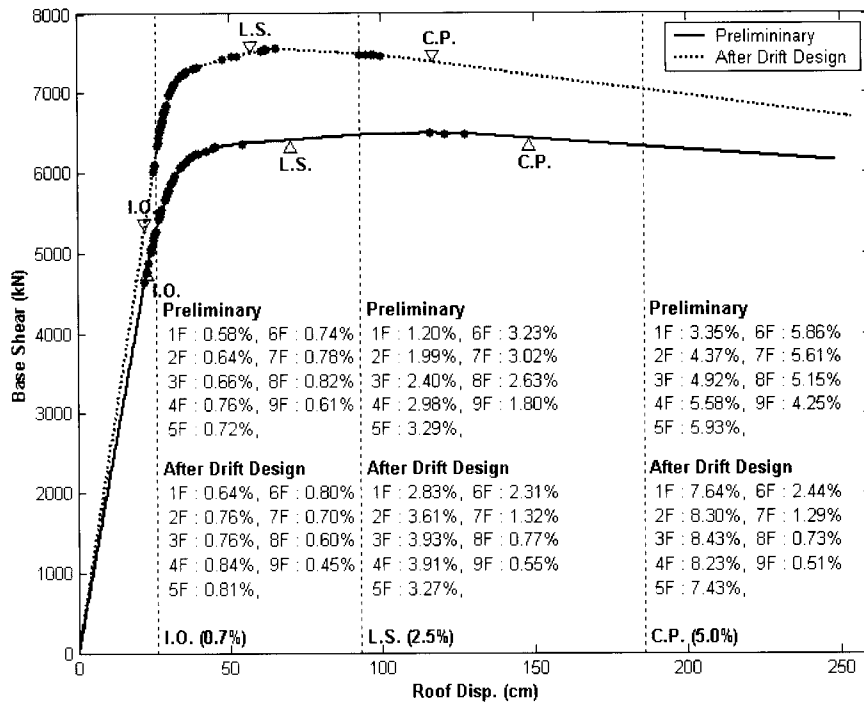
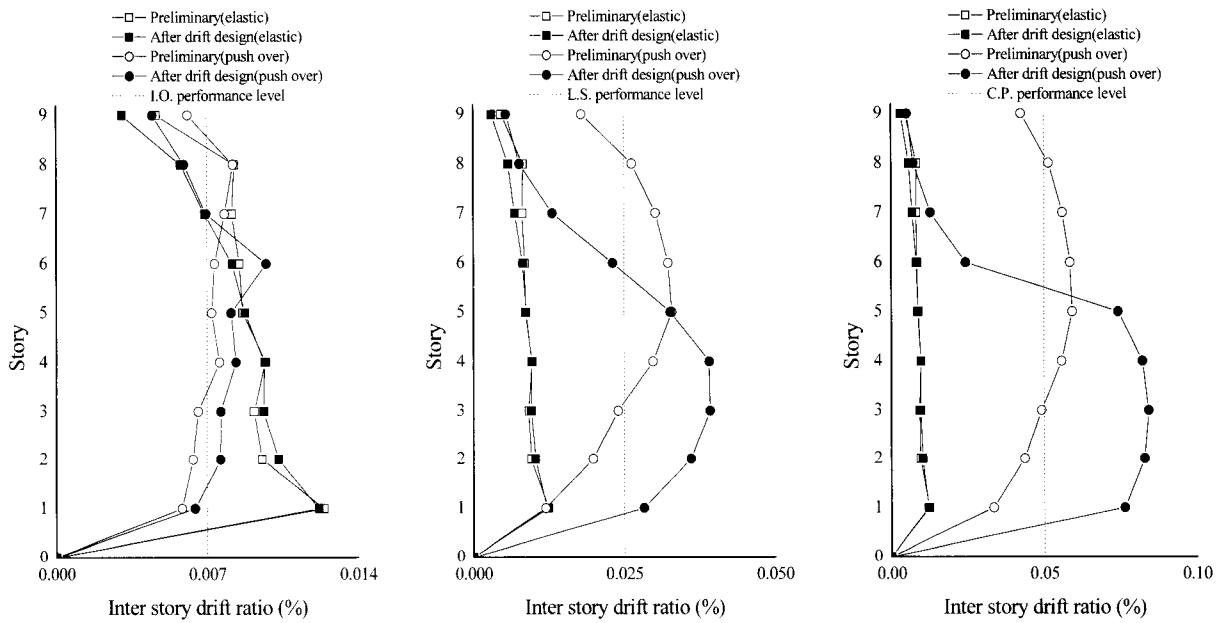


그림 11. Push-over curve(9층 5경간)



(a). I.O. 성능 단계

(b). L.S. 성능 단계

(c). C.P. 성능 단계

그림 12. 변위설계 적용 전·후의 층간 변위의 분포 (9층 5경간)

표 6. 변위 설계 적용 전·후의 고유주기(5경간 9층)

Mode	Preliminary	After drift design
1st	2.242	2.181
2nd	0.841	0.768
3rd	0.491	0.458
4th	0.331	0.321
5th	0.243	0.241

표 7. 최초 항복점과 횡 강성(9층 5경간)

구분	Initial yielding point (cm, kN)	Lateral Stiffness (kN/cm)	Cumulative Energy (kN · cm)
Preliminary	(22.15, 4639.94)	209.43	824363.00
After drift design	(25.23, 6022.45)	238.71	755654.58

표 8. Push-over 해석 결과 (9층 5경간)

Division	Performance level	Roof displacement (cm)	Ductility demand ( $\delta_{roof} / \delta_{yield}$ )	Base Shear (V, kN)	Spectral acceleration ( $S_a^{analysis} = Vg/W$ )
Preliminary	Operational	22.16	1.000	4639.938	0.105 g
	Immediate Occupancy	25.91	1.169	5288.044	0.120 g
	Life Safety	91.19	4.116	6462.374	0.146 g
	Collapse Prevention	183.48	8.282	6324.4789	0.143 g
After drift design	Operational	25.23	1.000	5275.144	0.119 g
	Immediate Occupancy	26.16	1.037	6234.625	0.141 g
	Life Safety	93.47	3.705	7487.689	0.169 g
	Collapse Prevention	189.99	7.531	7010.840	0.159 g

3.2.2 비선형 성능 평가

재분배 기법의 비선형 성능을 평가하기 위해서 초기 설계된 구조물과 재분배 기법에 의해 설계된 구조물에 대해 push-over 해석을 실시하였다. 구조물의 강성이 저하되는 것을 보기 위해 중력하중  $\omega$ 가 작용한 상태에서 수평하중을 점차적으로 증가시키면서 그림 11과 같은 push-over 곡선을 얻었다. Push-over 해석은 Drain-2DX를 이용하였으며 기둥과 보의 element type 02를 사용하였다. 기둥과 보의 재료 모델은 완전 탄소성 모델(Elastic-perfectly-plastic model)을 사용하였다. 횡력은 구조물 최상층 변위가 FEMA 273에서 제안하는 목표 변위에 도달할 때까지 증가시켰으며, 구조물 최상층의 변위와 각 층의 층간변위가 FEMA 273에 제시된 다양한 성능 레벨을 만족하는지 확인 하였다.

그림 11과 표 7은 재분배 기법 적용에 따라 초기 강성이 증가한 것을 나타내고 있으며, 그림 11의 push-over 곡선에서는 재분배 기법 적용에 따라 첫 번째 소성힌지 발생 시점이 지연된 것을 알 수 있다. 초기 강성의 증가는 재분배 기법 적용에 따라 변위가 감소하는 것과 같은 맥락에서 이해 될 수 있다. 구조물 최상층 변위(그림 11의 수직 점선)를 기준으로 보면, 재분배기법 적용 후에 최초 소성힌지의 발생 시점이 지연되며 I.O. 성능 레벨에서 소성힌지 발생 수도 줄어 든 것을 알 수 있다. 하지만 재분배 기법 적용에 따라 기둥의 물량은 감소하고 거더의 물량은 증가함으로 인해 재분배 후에는 저층부 기둥에 소성힌지가 집중되면서 저층부 층간 변위가 증가하게 된다. 각 층의 층간 변위가 각 성능 레벨을 초과하는 시점은 그림 11의 push-over 곡선에 삼각형 모양으로 표시하였다. 각 층의 층간 변위를 모니터링하여 I.O. L.S. 및 C.P. 성능 레벨을 초과하는 시점을 정리하면, 재분배 기법을 적용한 모델은 초기 모델에 비해 I.O. L.S. 및 C.P. 성능 레벨에서 최상층 변위 기준으로 각각 94.5 %, 81.2 %, 79.1 % 수준에서 층간 변위를 위배하는 것으로 나타난다. 즉, 층간 변

위 측면에서 재분배 기법 적용에 따라 I.O., L.S. 및 C.P. 성능 레벨을 위배하는 시점은 더 빨라짐을 알 수 있다.

표 8은 push-over 해석으로 얻어진 최상층 변위와 밀면전 단력 및 연성도 등을 보여준다. 변위 설계기법 적용에 따라 구조물의 연성(Ductility demand)은 I. O., L.S. 및 C.P. 성능 레벨에서 더 작은 값을 가짐으로서, 구조물의 연성도가 더 작아진 것을 알 수 있다. 재분배 기법 적용에 따라 전단력은 Operational, I. O. L. S., 및 C. P. 성능 레벨에서 각각 14 %, 18 %, 16 %, 11 % 증가한다. 각 층의 층간 변위를 모니터링하여 층간 변위가 C.P. 성능 레벨에 도달했을 때 에너지 흡수능력을 비교하면, 재분배 기법 적용 후의 모델의 에너지 흡수 능력이 초기 모델의 92%로 감소한다.

4. 결론

본 연구에서 사용된 모멘트 저항 골조 예제는 재분배 기법을 적용에 따라 구조물의 초기 강성은 증가하나 연성과 같은 비선형 성능은 저하되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 모멘트 저항 골조 시스템의 거동특성 상 재분배시 물량이 상대적으로 기여도가 큰 거더로 분배되었기 때문이며, 이러한 재분배 결과는 pushover 해석시 기둥에 소성힌지를 유발함으로써 구조물 전체의 연성을 및 에너지 흡수력은 감소시키게 된다. 본 연구에서는 제안된 재분배 기법의 비선형 특성 평가 모델의 모멘트 저항 골조 시스템 예제 적용을 통해, 모멘트 저항 골조시스템에 재분배 기법 적용시에는 비선형 특성을 고려할 수 있는 재분배 알고리즘의 개발이 필요한 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 모멘트 저항 골조시스템을 대상으로 재분배 기법의 비선형 특성을 평가하였으나, 모멘트 저항 골조 이외의 다른 구조시스템에서는 또 다른 비선형 특성을 나타낼 것으로 예상된다. 그러므로, 모멘트 저항 골조 시스템 뿐 만 아

나라 고층 건물에서 주로 사용되는 구조 시스템을 대상으로 개발된 비선형 특성 평가 모델을 적용하여 재분배 기법 적용에 따른 문제점을 파악하고, 강성 뿐만 아니라 비선형 특성을 고려한 재분배 기법을 개발하여야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

- 권봉근, 권윤한, 서지현, 박지형, 박효선(2005) 2차원 철골 구조물의 성능 목표별 최적 내진설계, 한국강구조공학회 발표논문집, Vol. 16, No. 1. pp. 265-270
- 권봉근, 이현국, 권윤한, 박효선(2005) 2차원 철골 구조물의 최적 성능기반 내진설계법 개발, 한국전산구조공학회 발표논문집, Vol. 18, No. 1. pp. 636-643
- 박효선, 서지현, (2004) 부재력 특성을 고려한 설계 변수를 사용한 고층건물 변위조절설계법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 17, No. 2, pp. 215-222
- 서지현, 박효선(2004) 프레임-전단벽 구조물의 동적 변위조절 설계법 개발에 관한 기초 연구, 한국강구조공학회 발표논문집, Vol. 15, No. 1. pp. 306-313
- 서지현, 박효선(2004) 횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위설계를 위한 재분배 기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 17, No. 1. pp. 49-58
- 차성희, 서지현, 박효선(2004) 가새-프레임 시스템의 동적 재분배 기법, 한국전산구조공학회발표논문집, Vol. 17, No. 2. pp. 143-149
- 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 Zou, X. K. (2002) Optimal inelastic drift design of reinforced concrete structures under pushover loading, The Second China- Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, pp. 779-784
- 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.
- Federal Emergency Management. Agency, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Rep. FEMA 273, 1997, Washington, DC.
- Forrest-Brown, G. and Samali, B. (1990) "Practical Optimization of Framed Structures Using Virtual Work Principals", 4th World Convention and Exhibition Center, CTBUH, pp. 1019-1029.
- Gupta, A. and Kranwinkler, H. (2000) "Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels", *Journal of structural engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 1, pp. 98-107.
- Hasan, R. Xu l... and Grierson D. E. (2002) "Push-over analysis for performance-based seismic design", *Computers & Structures*, Vol. 80, pp. 2483-2493.
- Park H. S., Hong K. P., Seo J. H. (2002) Drift Control of Steel-frame Shear-wall Systems for Tall Buildings. *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 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(3): 23-35.
- Park, H. S. and Sung, C. W.(2002) Optimization of steel structure using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computer, *Computers & structures*, Vol. 80, pp. 1305-1316
- S. Ganzerli, C. P. Pantelides and L. D. Reaveley (2000) Performance-based design using structural optimization. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, April, pp. 1677-1690
- Seo H. S., Hong K. P., Seo J. H. (2004) Drift Design Method for High-rise Buildings using Dynamic Resizing Algorithm. *Proceedings of the CTBUH 2004 Seoul Conference*, Vol. 2, pp. 1052-1056
- Woo, B. H. and Park H. S. (2002) Distributed Hybrid Genetic Algorithm for Structural Optimization, *Proceedings of CJK-OSM2*, pp. 117-122

(접수일자 : 2005. 12. 13 / 심사일 2005. 12. 22 /  
심사완료일 2006. 3. 31)