

재분배 기법의 비선형 특성 개선을 위한 기초 연구

Basic Research to Improve the Inelastic Performance of Resizing Algorithms

권도형* · 서지현** · 박효선***

Kwon, Do-Hyung · Seo, Ji-Hyun · Park, Hyo-Seon

ABSTRACT

Recently, the resizing algorithms based on the displacement participation factors have been developed for sizing members to satisfy stiffness criteria. It is proved that this resizing algorithms made for utilizing worker's stiffness design are practical and rational when applied to aseismatic design in the range of elastic until now. However, by the preceding research we confirmed that the inelastic performance of steel moment-resisting frame designed by resizing algorithms is not better than that of the frame before resizing. We present therefore a plan for improving inelastic performance of steel moment-resizing frame to which resizing algorithms applied in this paper.

Keywords : *Drift Design, Resizing algorithm, Push-over, Inelastic, Column-beam moment ratio.*

1. 서론

최근 다양한 고층 건물의 출현과 더불어 건물의 변위 및 층간변위를 효과적으로 제어할 수 있는 강성 설계에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 고층 구조물의 구조 설계는 부재의 강도보다는 강성에 의해 좌우되므로 횡력에 대한 최대 강성 확보가 구조물의 사용성 및 안전성은 물론이며 구조시스템의 경제성을 결정하기 때문이다. Park & Seo는 에너지 이론에 근거한 재분배 기법을 고층 건물 강성 설계법으로 제안하였다. 재분배 기법은 최상층 변위에 대한 각 부재들의 변위기여도를 정량적으로 구한 후, 이를 근거로 최적화 기법을 이용하여 물량을 재분배함으로써 고층 건물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있는 실용적인 고층 건물 강성 설계법이다.

하지만 국내 내진 관련 규준이 탄성 해석을 하고 있으므로 강성설계의 실용화를 목표로 개발된 본 알고리즘이 구조물의 비선형 해석에서 어떠한 문제점이 있는지 연구해야할 필요성이 있었다. 그리고 Seo(2005)는 2차원 모멘트 저항골조의 재분배 후 비선형 해석의 문제점에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과는 기둥과 거더만으로 구성된 모멘트 저항 골조의 경우 거더의 변위기여도가 크기 때문에 재분배 기법을 적용하면 물량이 기둥에서 거더로 이동하게 된다는 것이다. 이러한 물량의 이동은 탄성 범위에서는 강성 측면에서 유리하지만, 비선형 해석 시에는 기둥의 소성힌지 발생을 유발함으로써 구조물 전체의 연성을 및 에너지 흡수력은 감소시키게 된다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 재분배된 2차원 모멘트 저항 골조의 비선형 특성 개선 방안을 제시하고 FEMA273에서 분류된 다양한 성능 기준을 적용하여 평가해 본다.

* 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 석사 과정 E-mial: katruik@paran.com

** 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 박사 후 과정 E-mail: seojh@yonsei.ac.kr

*** 정회원 · 연세대학교 건축도시공학부 부교수 E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

2. AISC의 'Seismic Provisions for Structural Steel Buildings'

2-1 강기둥-약보의 개념

미국 AISC의 'Seismic Provisions for Structural Steel Buildings'에서는 모멘트 프레임의 내진설계 시에 최소한의 요구 조건으로 강기둥-약보의 개념을 지키도록 규정하고 있다. 여기서 강기둥-약보의 개념은 단지 구조물의 각 절점에서 기둥의 휨강도가 보의 휨강도보다 높은 것을 의미하는 것이 아니라, 모멘트 프레임의 전체 절점에 대한 힌지 발생순서가 기둥보다 보에서 먼저 일어날 수 있도록 유도하는 것이다. Schneider et al.(1991), Roeder(1987) 등은 프레임의 전 층에서 보의 휨강도보다 기둥의 휨강도를 전체적으로 더 강하게 설계하는 강기둥-약보의 개념을 통해서 구조물의 에너지 소산에 대한 효율성을 높일 수 있음을 보여줬다.

2-2 기둥-보 모멘트비

이러한 강기둥-약보의 개념은 'Seismic Provisions for Structural Steel Buildings'에서 식 1을 따를 것을 규정하고 있다. 이 방정식을 따르는 것이 모멘트 프레임 구조물에서 전체 기둥이 국부좌굴을 일으키지 않는 다거나, 항복하지 않는 것을 말하는 것은 아니지만, 구조물의 비선형성의 평가 시에 기둥의 항복 보다 보의 항복이 다소 우세할 수 있도록 설계하는 개념이다.

$$\frac{\sum M_{pc}}{\sum M_{pb}} > 1.0 \quad (\text{식 1})$$

$$\sum M_{pc} = \text{빔과 기둥의 교차점의 절점에서 아래, 위 기둥의 모멘트의 합}$$

$$\sum M_{pc} = \sum Z_c(F_{yc} - P_{uc}/A_g) \quad (\text{식 2})$$

$$\sum M_{pb} = \text{빔과 기둥의 교차점의 절점에서 아래, 위 빔의 모멘트의 합}$$

$$\sum M_{pb} = \sum (1.1R_y M_p + M_v) \quad (\text{식 3})$$

A_g = 기둥의 순수 단면적

F_{yc} = 기둥의 최소 항복 강도

P_{uc} = 요구되는 기둥의 압축 강도

Z_c = 기둥의 소성 단면 계수

R_y = 최소 항복 강도(F_y)에 대해 예상되는 항복 강도(F_{ye})의 비

3. 구조물의 기둥-보 모멘트비의 재분배를 위한 구조 정식화

3-1 구조 정식화

절점별 기둥-보 모멘트비는 알고자하는 절점에 대한 각 보의 모멘트 합에 대한 기둥 모멘트 합을 나눈 값이라 할 수 있으며, 연성계수(μ)는 탄성영역의 최대 변위(u_y)에 대해 연성영역의 최대 변위(u_m)을 나눈 값으로 절점별 기둥-보 모멘트비와 연성계수는 구조물의 연성을 나타내는 계수가 된다. 그리고 두 값은 구조물

의 연성에 비례한다고 할 수 있다.

최적화 기법 적용을 위해서 목적함수와 제약함수가 설계변수로 표현이 되어야 하는데, 목적함수는 각 절점의 기둥-보 모멘트비의 역수(η_j)를 최소화하는 것으로 설계 변수는 부재 단면적을 사용하며, 기둥-보 모멘트비의 역수는 식 4에 의해 구조물의 연성에 선형 반비례한다고 가정하였으며, 제약함수는 물량 분배 전·후의 물량이 변화 없는 것으로 정식화하였다.

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad ; \quad \mu = \text{연성계수} \quad \text{and} \quad \eta = \frac{\sum M_{pb}}{\sum M_{pc}} < 1 \quad \text{then} \quad \eta \propto \frac{1}{\mu} \quad (\text{식 4})$$

$$\text{Minimize } \eta_t = \sum_{j=1}^m \frac{\eta_j}{\gamma_j} \quad (\text{식 5})$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^m W_j = \sum_{j=1}^m \gamma_j W_j \quad (\text{식 6})$$

여기서 γ_j, W_j 는 각각 j번째 절점의 물량 수정계수, 물량을 나타내며, m 은 전체 절점수를 나타낸다. η_t, η_j 는 각각 제어하고자 하는 구조물의 기둥-보 모멘트비 역수의 합, j번째 절점의 기둥-보 모멘트비의 역수를 나타낸다. 제약 최소화 무제를 라그랑지 승수 (λ_L , Lagrangian Multiplier)를 이용하여 아래와 같은 무 제약 최소화 문제로 치환할 수 있다.

$$\text{Minimize } \eta_t = \sum_{j=1}^m \frac{\eta_j}{\gamma_j} + \lambda_L \left\{ \sum_{j=1}^m W_j - \sum_{j=1}^m \gamma_j W_j \right\} \quad (\text{식 7})$$

위와 같은 가목적 함수를 K-T 조건(Kuhn-Tucker Condition)을 이용하여 λ_L, γ_j 에 대해서 미분하여 0로 두면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma_j} = -\frac{\eta_j}{\gamma_j^2} + \lambda_L W_j = 0 \quad (\text{식 8})$$

$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \lambda_L} = \sum_{j=1}^m W_j - \sum_{j=1}^m \gamma_j W_j = 0 \quad (\text{식 9})$$

이를 정리하면 단면수정계수 γ_j 는 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma_j = \sqrt{\frac{\eta_j}{W_j}} \frac{\sum_{j=1}^m W_j}{\sum_{j=1}^m \sqrt{\eta_j W_j}} \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{식 10})$$

3.2 구조 정식화에 따른 기둥-보의 물량 분배 법칙

기둥 및 보의 단면적 $A_i^c = I$ 번째 기둥의 단면적

$A_i^b = I$ 번째 보의 단면적

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad ; \quad \mu = \text{연성계수} \quad \eta = \frac{\sum M_{pb}}{\sum M_{pc}} < 1.0, \quad \eta \propto \frac{1}{\mu}$$

$$A_i^c \propto \frac{1}{\eta_i} \quad \& \quad A_i^b \propto \eta_i \quad \text{and} \quad \gamma_i \times \eta_i = \eta_i^{new} \quad (\text{식 11})$$

$$A_i^c \propto \frac{1}{\gamma_i} \quad \& \quad A_i^b \propto \gamma_i \quad (\text{식 12})$$

수정계수를 곱한 새로운 기둥의 단면 $A_j^c \times \frac{1}{\gamma_j} = A_j^{c-new}$ (식 13)

수정계수를 곱한 새로운 보의 단면 $A_j^b \times \gamma_j = A_j^{b-new}$ (식 14)

4. 예제 적용 및 결론

4.1 3층 4경간 예제의 재분배 기법 적용 결과

재분배 기법의 결과 및 비선형 성능의 평가를 위해서 선행 연구(Hassan and Grierson, 2002; Gupta and Krawinkler, 2000)에서 사용한 그림 1과 같은 예제를 선택하였다. 이 예제는 3층 4경간 철골 강접 골조 프레임으로서 총 27개의 부재가 5개의 그룹으로 나뉘어져 있으며 초기 모델은 IBC 2000 지진하중을 만족하도록 설계되었다.(표 1 참조). 지진하중은 IBC 2000(site class D, Ss=1.0, S1=0.5)을 따른 응답 스펙트럼 해석법이 사용되었다. 기둥과 보의 공칭강도는 248MPa 이며, 일반층과 지붕층의 중력하중은 그림 1과 같다.

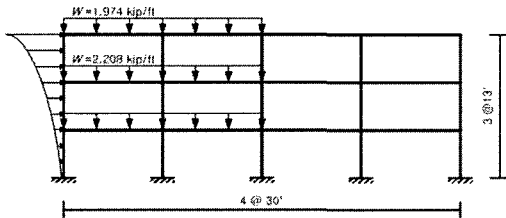


그림 1. 3층 4경간 철골 강접 골조

표 1. 재분배 기법 적용 전·후의 부재 종류

부재종류	그룹번호	초기 설계	수정계수	재분배후
외부 기둥	1	W14×257	0.747	W14×193
내부 기둥	2	W14×311	0.947	W14×283
1층 거더	3	W33×118	1.171	W33×141
2층 거더	4	W30×116	1.254	W33×141
3층 거더	5	W24×68	1.124	W24×76

4.1.1 비선형 성능 평가

본 연구에서는 재분배 기법의 비선형 성능을 평가하기 위해서 초기 설계된 구조물과 재분배 기법에 의해 설계된 구조물에 대해 push-over 해석을 실시하였다. Push-over 해석은 Drain-2DX를 이용하였으며 기둥과 보의 element type 02를 사용하였다. 기둥과 보의 재료 모델은 완전 탄소성 모델(Elastic-perfectly-plastic model)을 사용하였으며, 다음의 그림은 FEMA 273의 성능 목표 C.P.에 대한 구조물의 한지 발생 위치 및 기둥-보 모멘트비의 역수를 나타낸다.

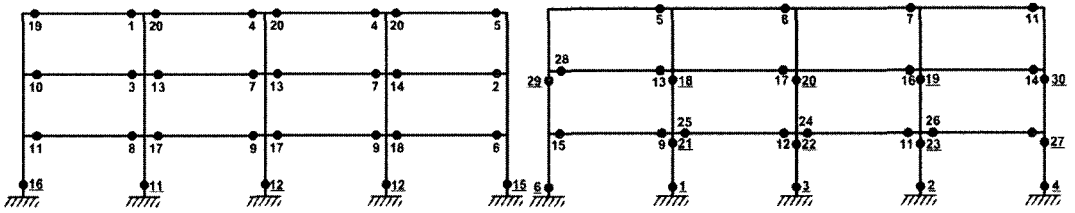


그림 2 재분배 전, 후의 C.P.점에서의 힌지 발생 순서

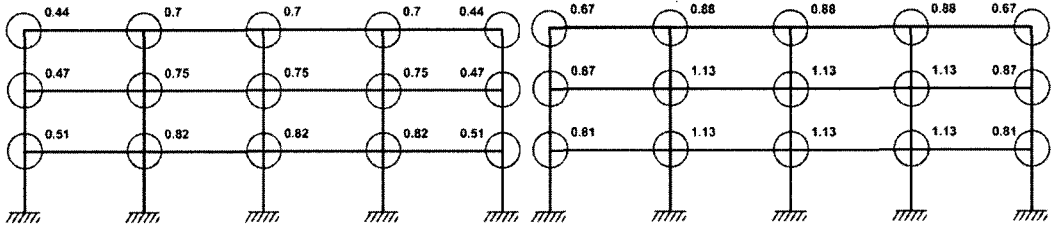


그림 3 재분배 전, 후의 절점별 기둥-보 모멘트비의 역수

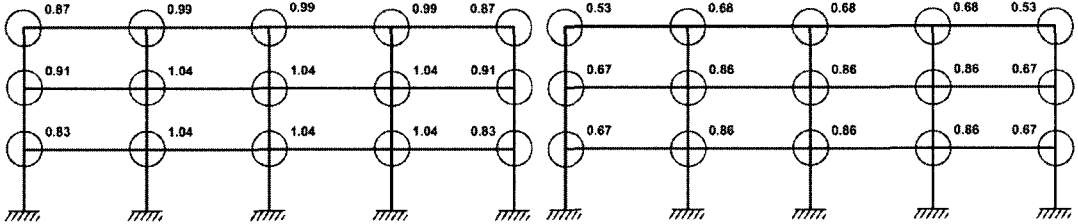


그림 4 정식화 적용 후의 η 값

그림 5 물량 분배 후의 η 값

그림 2는 C.P.점에서 재분배 전, 후의 소성힌지 발생순서 및 위치를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 재분배 전의 구조물은 거더에서 먼저 순차적으로 힌지가 발생한 후 기둥에서 힌지가 발생함을 알 수 있다. 하지만, 재분배가 끝난 구조물의 경우 처음부터 기둥에서 소성힌지가 발생하는 것으로 보아 일반적으로 말하는 강기둥-약보의 개념이 지켜지지 못하고 있는 것을 알 수 있었다.

그림 3은 각 절점에 대한 기둥-보 모멘트비의 역수를 보여주고 있다. 재분배 전 구조물이 강기둥-약보의 개념을 지키기 위해 기둥-보 모멘트의 역수 비가 1보다 작아야 된다는 조건을 만족하는 것에 반하여, 재분배 후의 구조물은 그 조건을 만족하지 못하고 있으며, 기둥-보 모멘트 역수의 비가 1보다 큰 값을 가지는 절점의 위치와 기둥에서 소성힌지가 발생하는 절점의 위치는 동일함을 알 수 있다.

따라서, 재분배 후 구조물 절점의 기둥-보 모멘트비의 역수를 위에서 언급한 구조 정식화를 이용한 결과 그림 4와 같은 절점별 기둥-보 모멘트비의 역수를 얻을 수 있었다. 또한, 그림 4의 절점별 기둥-보 모멘트비의 역수에 따른 수정계수를 이용해 보, 기둥에 대한 물량을 다시 한 번 재분배 하면, 그림 5와 같은 값을 얻을 수 있었으며 그 결과는 'Seismic Provisions for Structural Steel Buildings'에서 말하는 강기둥-약보 개념을 만족함을 알 수 있다.

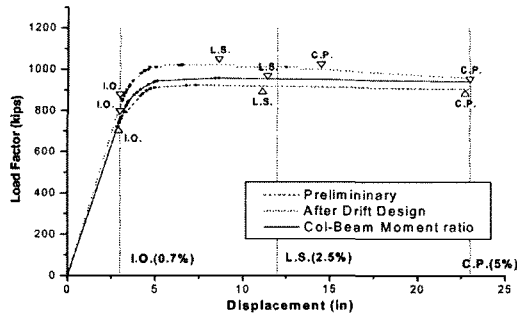


그림 6 Push-over curve (3층 4경간)

그림 6는 재분배 전, 후의 구조물과 재분배가 끝난 구조물을 다시 기둥-보 모멘트비의 역수를 만족하도록 최적화한 구조물, 이렇게 3가지의 3층 4경간 모멘트 저항 골조에 대한 Push-over 곡선을 나타낸다. 구조물의 최상층 변위와 각 층의 층간변위가 FEMA 273에 제시된 다양한 성능 레벨을 만족하는지 확인 하였다. FEMA 273에서 Immediate-Occupancy(I.O), Life-Safety(L.S), Collapse-Prevention(C.P) 에 대한 철골 구조물의 목표 변위를 각각 0.7%, 2.5%, 5%로 제시되어 있다.

그림 6을 보면 구조물의 변위가 탄성 범위에서는 16.35cm이지만, 재분배 후에 13.93cm로 초기 변위의 85%로 제어되었다. 하지만 Push-over 결과를 통해 본 C.P.지점에서의 변위는 57.66cm에서 36.83cm로 재분배가 끝난 구조물의 변위가 초기 변위의 64%이며, 이는 재분배가 끝난 구조물은 연성범위에서 오히려 빨리 붕괴되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 재분배 된 구조물을 다시 기둥-보 모멘트비의 역수로 구조 정식화한 뒤 물량을 재분배 한 결과를 확인해 보면, 탄성 범위의 변위는 14.74cm로 초기 변위의 90%로 제어 되었을 뿐만 아니라, C.P.지점의 변위는 58.42cm으로 오히려 초기 구조물 보다 조금 늦게 붕괴되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 재분배가 끝난 모멘트 저항 골조가 AISC의 'Seismic Provisions for Structural Steel Buildings'에서 제시하는 기둥-보 모멘트비를 만족하면서 재분배 되었다면 그 구조물은 탄성 범위에서 변위가 제어될 수 있을 뿐 아니라, 연성을 또한 보장 할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

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

참고문헌

AISC (1997, 2000). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, IL.
 FEMA (1997, 2000). NEHRP guidelines, commentary, and prestandard for the seismic rehabilitation of buildings *FEMA Publication 273*, Washington, DC.
 Hasan, R. Xu I., and Grierson D. E. (2002) "Push-over analysis for performance-based seismic design", *Computers & Structures*, Vol. 80, pp. 2483-2493.
 Bong Keun Kwon, Ji Hyun Seo, Yun Han Kwon, and Hyo Seon Park (2005). "Effect of resizing algorithm for drift design on inelastic behavior of steel frame", *International Symposium on Steel Structures*, Vol. 5, pp. 1080-1087.