

## 2차 비탄성해석과 단면점증법을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계

### Optimum Design of Plane Steel Frames Using Second-Order Inelastic Analysis and Section Increment Method

최 세 휴\*

Choi, Se-Hyu

#### Abstract

In this paper, the optimum design of plane steel frames using second-order inelastic analysis and section increment method is presented. Since the second-order inelastic analysis accounts for geometric and material nonlinearities of the whole system as well as its component members, the design method based on second-order inelastic analysis does not require separate member capacity checks after analysis. A section increment method proposed by this paper is used as optimization technique. The weight of structures is treated as the objective function. The constraint functions are defined by load-carrying capacities, deflections, inter-story drifts, and ductility requirement. The effectiveness of the proposed method are verified by comparing the results of the proposed method with those of other method.

#### 요 지

본 연구에서는 2차 비탄성해석과 단면점증법을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계 방법을 제시하였다. 2차 비탄성해석은 구조시스템과 그에 속한 부재들의 기하학적 비선형과 재료적 비선형을 고려하기 때문에 2차 비탄성해석에 바탕을 둔 설계법에서는 해석 후 개별부재의 강도검토가 필요 없다. 본 논문에서 제안한 단면점증법을 최적화 기법으로 사용하였으며 목적함수로 구조물의 중량을 사용하였다. 제약조건식은 구조시스템의 하중-저항능력, 처짐 및 층간 수평변위 등을 고려하였으며 제안된 방법에 의한 설계결과를 다른 방법에 의한 것들과 비교하여 그 효율성을 증명하였다.

**Keywords** : Optimum design, Second-order inelastic analysis, Section increment method

**핵심 용어** : 최적설계, 2차 비탄성해석, 단면점증법

\* 정희원, 경북대학교 건축토목공학부 조교수

E-mail : shchoi@knu.ac.kr 053-950-7582

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

현재 많이 사용되고 있는 강골조 구조물의 설계방법인 하중저항계수설계법(LRFD)에서는 선형탄성해석 결과를 토대로 모멘트 확대계수  $B_1$ 과  $B_2$ 를 도입하여 비선형효과를 고려한다. 강골조 구조물을 횡방향 변위가 방지된 경우와 횡방향 변위가 있는 경우로 나누어 선형탄성해석을 하고 부재별 최대 모멘트를 구한 다음 모멘트 확대계수  $B_1$ 과  $B_2$ 를 각각 곱하여  $P-\delta$  효과와  $P-\Delta$  효과를 고려한다. 따라서, 이 방법은 횡방향변위가 방지된 경우의 최대모멘트 위치와 횡방향변위가 있는 경우의 최대모멘트 위치가 서로 같지 않음에도 불구하고 이를 그대로 사용하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하고 구조물의 실제 비선형 거동을 합리적으로 반영하고자 하는 비선형해석에 기초한 설계법이 많이 연구되고 있다. 기하학적인 비선형과 잔류응력과 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화 및 시공시 발생할 수 있는 기하학적인 불완전성을 동시에 고려할 수 있는 비선형해석은 크게 소성영역해석과 소성힌지해석으로 대분할 수 있다. Chen과 Kim (1997)은 소성영역해석의 정확성과 소성힌지해석의 간편성을 가진 2차 비탄성해석을 개발하였다. 또한, Liew와 Tang(1998) 및 박문호(2000) 등에 의하여 여러 가지 비선형해석기법이 개발 및 검증되었다.

구조물의 최적설계는 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 실용적인 측면을 위해 규격화된 부재를 사용한 이산화 최적설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 비선형해석에 기초한 설계법에도 최적화에 대한 연구가 Schinler(2000), Pezeshk 등(2000) 및 윤영묵과 김병현(2004) 등 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있다. 그러나, 이들 방법들은 최적화 기법으로 유전자알고리즘(Genetic algorithm)을 채택함으로써 계산시간이 많이 요구되는 단점을 가지고 있다. 특히 2차 비탄성해석과 같이 비선형해석을 수행하는 설계방법에 유전자 알고리즘을 최적화 기법으로 채택함으로써 일반적인 최적설계보다 더 많은 설계시간이 요구된다. Choi와 Kim(2002)은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 단면점증법을 개발하였으나, 가장 취

약한 단면을 선택하기 위하여 유효길이계수를 구하는 복잡한 계산과정을 거쳐야 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 단면점증법의 문제점을 해결하고 효율성을 개선한 수정된 단면점증법을 개발하고자 한다.

## 2. 2차 비탄성해석

### 2.1 기하학적 비선형

본 연구에서는 기하학적인 비선형을 고려하기 위하여 안정함수를 사용하였다. 안정함수는 축력에 의해 휨 강성이 감소하는 영향을 고려하는 함수로서 부재를 하나 또는 두 개의 요소로 이상화하여 기하학적인 비선형을 효과적으로 고려할 수 있다.(Kim and Chen, 1997) 보-기둥 부재의 안정함수를 이용한 힘-변위의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta P \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta M_A$ ,  $\Delta M_B$  및  $\Delta P$ 는 부재의 A단 및 B단에 작용하는 증분 휨모멘트 및 증분 축력을 각각 나타내며,  $E$ 는 탄성계수,  $I$ 는 단면 2차모멘트,  $L$ 은 부재의 길이 및  $A$ 는 부재의 단면적을 나타낸다.  $\Delta \theta_A$ ,  $\Delta \theta_B$  및  $\Delta \delta$ 는 부재의 A단 및 B단의 증분회전각 및 증분 축변형량을 각각 의미하며  $s_1$ 과  $s_2$ 는 안정 함수로서 식(2)와 같다.(Chen과 Kim 1997)

(1) 인장인 경우

$$S_1 = \frac{\pi^2 \rho \cosh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2a)$$

$$S_2 = \frac{\pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2 \rho}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho}) + \pi\sqrt{\rho} \sinh(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2b)$$

(2) 압축인 경우

$$S_1 = \frac{\pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho}) - \pi^2\rho \cos(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2c)$$

$$S_2 = \frac{\pi^2\rho - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho}) - \pi\sqrt{\rho} \sin(\pi\sqrt{\rho})} \quad (2d)$$

여기서  $\rho = P/(\pi^2 EI/L^2)$ 이며,  $P$ 는 부재의 축력이다.

## 2.2 축력에 의한 점진적인 소성화

H-형강이 압축력을 받게 되면 단성에서 소성으로 부드러운 곡선 형태의 응력-변위률이 된다. 이것은 H-형강의 제작시에 비균등 냉각에 따른 잔류응력이 발생하기 때문이다. 압축 잔류응력을 갖는 H-형강의 끝단부터 항복을 시작하여 인장응력을 갖고 있는 단면 중앙부까지 점진적인 소성화가 일어난다. 이러한 점진적 소성화는 H-형강의 강성을 점진적으로 저하시킨다. 잔류응력을 가진 부재가 축력에 의하여 점진적으로 항복하는 것을 고려하기 위하여 본 연구에서는 CRC 접선탄성계수를 사용하였다. 즉 단면의 점진적 소성화에 따른 단면 탄성부분의 감소를 탄성계수를 감소시킴으로서 고려하였다. 접선탄성계수는 식(3)과 같이 축력의 함수로 나타낼 수 있다.(Chen and Lui 1992)

(1)  $P \leq 0.5P_y$  인 경우

$$E_t = 1.0E \quad (3a)$$

(2)  $P > 0.5P_y$  인 경우

$$E_t = 4\frac{P}{P_y} E \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad (3b)$$

여기서  $P_y$  는 부재의 항복강도이다.

## 2.3 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화

H-형강이 휨모멘트를 받을 경우 모멘트-곡률관계는 탄성영역에서 완전 소성상태로 점차적인 곡률변화를 나타낸다. 이러한 현상은 H-형강이 휨을 받을때 단면

의 최연단부터 항복하기 시작하여 중심부로 점진적으로 항복하기 때문이다. 이러한 점진적인 항복을 고려하기 위하여 본 연구에서는 점진적인 강성 감소모델을 사용하였으며 식(4)와 같이 포물선 함수로 나타낼 수 있다.

(1)  $\alpha \leq 0.5$  인 경우

$$n = 1 \quad (4a)$$

(2)  $\alpha > 0.5$  인 경우

$$n = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (4b)$$

여기서,  $\alpha$ 는 단면의 부재력 크기를 나타내는 함수이며, AISC-LRFD (1993)의 완전소성면을 이용하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

(1)  $\frac{P}{P_y} \geq \frac{2}{9} \frac{M}{M_p}$  인 경우

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} \quad (5a)$$

(2)  $\frac{P}{P_y} < \frac{2}{9} \frac{M}{M_p}$  인 경우

$$\alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M}{M_p} \quad (5b)$$

따라서, 보-기둥 부재의 점진적인 강성 감소모델을 고려한 휨-변위의 관계는 식(6)과 같이 정식화된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta M_A \\ \Delta M_B \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & 0 \\ k_{ij} & k_{jj} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $E_t$ 는 축력에 의한 점진적인 소성화를 나타내는 부재의 접선탄성계수로서 식(3)과 같고  $k_{ii}$ ,  $k_{ij}$  및  $k_{jj}$ 는 식(7)과 같다.

$$k_{ii} = n_A \left[ S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - n_B) \right] \frac{E_t I}{L} \quad (7a)$$

$$k_{ij} = n_A n_B S_2 \frac{E_t I}{L} \quad (7b)$$

$$k_{ji} = n_B \left[ S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - n_A) \right] \frac{E_f I}{L} \quad (7c)$$

식(7)에서  $\eta_A$  및  $\eta_B$ 는 축력과 휨에 의한 점진적인 소성화를 나타내는 부재의 A단과 B단의 포물선 함수이며,  $\eta_A$ 와  $\eta_B$ 의 조건에 따른 부재의 거동 현상은 다음과 같다.

(1)  $\eta_A = \eta_B = 1$  일 경우 부재의 양쪽 단부 A단과 B단이 모두 탄성상태에 있음을 나타낸다.

(2)  $\eta_A = 1$  이고  $0 < \eta_B < 1$  일 경우 부재의 A단은 탄성상태에 있고 B단은 부분적인 항복상태에 있음을 나타낸다.

(3)  $0 < \eta_A < 1$  이고  $\eta_B = 1$  일 경우 부재의 A단은 부분적인 항복상태에 있음을 나타내고, B단은 탄성상태에 있음을 나타낸다.

(4)  $0 < \eta_A < 1$  인 경우 부재의 A단이 부분적인 항복상태임을 나타내고,  $0 < \eta_B < 1$  인 경우 부재의 B단이 부분적인 항복상태임을 나타낸다.

(5)  $\eta_A = 0$  일 경우 부재의 A단에서 소성힌지가 생성된 상태를 나타내며,  $\eta_B = 0$  일 경우 부재의 B단에서 소성힌지가 생성된 상태를 나타낸다.

## 2.4 기하학적 불완전 모형

기하학적 불완전성은 부재의 제작과정이나 시공시 발생하는 것으로 부재가 완전한 직선이 아니거나 구조물을 정확하게 수직으로 세울 수 없을 경우에 발생한다. 이러한 기하학적 불완전성은 부재에 더 큰 모멘트를 발생시켜 휨에 대한 강성을 감소시키는 요인이 된다. AISC-LRFD(1993)에서는 횡방향 변위가 방지된 구조물의 경우 직선도에 대한 불완전성에 대하여 부재의 중간에서 수직오차를 기둥길이의 1/1000로 제한하고 있다. 본 연구에서도 수직오차를 기둥길이의 1/1000로 하여 기둥부재를 두개의 요소로 모델링하였다. 이 방법에 대한 정확도는 이미 검증이 된 바 있다 (Kim과 Chen, 1996a). 또한, 횡방향 변위가 있는 구조물의 경우 AISC-LRFD(1993)에서는 시공시 발생하는 수직오차를 기둥길이의 1/500로 제한하고 있

으므로 본 연구에서도 수직도에 대한 불완전성을 기둥길이의 1/500으로 하였다. 이 값은 횡변위가 방지된 경우의 비직선도 기둥길이의 1/1000과 개념적으로 같다. (Kim과 Chen, 1996b)

## 3. 최적 설계

### 3.1 최적화 알고리즘

#### 3.1.1 단면점증법

단면점증법은 Choi와 Kim(2002)이 제안한 방법으로 2차 비탄성해석에 의한 강골조 구조물의 직접설계 시스템의 이산화 최적화기법으로 개발되었다. 단면점증법은 가장 가벼운 단면을 초기단면으로 선택한 후 2차 비탄성해석을 수행하면서 단면을 단계별로 하나씩 증가시킴으로서 요구되는 구조시스템의 강도를 만족시키도록 하는 최적화 알고리즘이다.

단면점증법에서 가장 중요한 개념은 다른 최적화 기법과 마찬가지로 어떤 설계변수를 어떤 방향으로 얼마만큼 증가 또는 감소시킬 것인가 하는 것이다. 단면점증법에서는 먼저 초기단면 즉 가장 가벼운 단면으로 구성된 구조물에 대하여 2차 비탄성해석을 실시한다. 구조시스템의 극한강도에서의 단면력을 이용하여 구조물의 모든 부재에 대하여 LRFD 상관방정식의 값을 나타내는 식(8)로부터  $\alpha$ 값을 계산한다. 가장 큰  $\alpha$ 값을 가진 부재 즉 가장 취약한 부재를 현재보다 한 단계 증가시킨다. 이러한 과정을 반복함으로써 하중저항능력에 대한 제약조건을 만족시킴으로서 최종적으로 가장 가벼운 단면을 가진 구조물을 찾는 최적화 방법이다.

$$(1) \frac{P}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \text{ 인 경우} \\ \alpha = \frac{P}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M}{\phi_b M_p} \quad (8a)$$

$$(2) \frac{P}{\phi_c P_n} < 0.2 \text{ 인 경우} \\ \alpha = \frac{P}{2\phi_c P_n} + \frac{M}{\phi_b M_p} \quad (8b)$$

여기서,  $\phi_c$ 와  $\phi_b$ 는 각각 축력과 휨에 대한 강도감소 계수이다.  $P$  및  $M$ 는 각각 축력 및 휨모멘트이다.  $M_n$ 은 단면의 공칭 휨강도로서 단면을 조밀단면으로 가정하여 단면의 소성 휨모멘트  $M_p$ 를 공칭 휨강도로 사용하였으며,  $P_n$ 은 공칭 압축강도로서 식(9)와 같다.

$$(1) \lambda_c \leq 1.5 \text{ 일 때} \\ P_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y A \quad (9a)$$

$$(2) \lambda_c > 1.5 \text{ 일 때} \\ P_n = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_y A \quad (9b)$$

여기서,  $\lambda_c$ 는 세장비로서  $L$ 을 부재의 비지지장,  $K$ 를 유효길이계수,  $r$ 을 회전반경이라 하면 식(10)과 같다.

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (10)$$

단면점증법에서는 Dumonteil(1992)가 제안한 유효길이계수를 사용하며, 구조물의 횡방향 변위가 방지되어 있는 경우에는 식(11)을, 횡방향 변위가 허용되어 있는 경우에는 식(12)를 사용한다.

$$K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (11)$$

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4.0(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (12)$$

식(11) 및 식(12)에서  $G_A$  및  $G_B$ 는 기둥 단부 A 및 B에서 보-기둥에 대한 강성비  $G$ 로서 하중 증분에 따른 부재의 점진적인 소성화와 관계없이 부재를 탄성으로 가정하여 식(13)과 같이 나타내었다.

$$G = \frac{\sum \frac{E_c I_c}{L_c}}{\sum \frac{E_g I_g}{L_g}} \quad (13)$$

여기서  $\sum E_c I_c / L_c$ 는 기둥부재의 단부에서 모든 기둥의 강성도의 합,  $\sum E_g I_g / L_g$ 는 기둥부재의 단부에서 모든 거더의 강성도의 합을 나타낸다.

### 3.1.2 수정된 단면점증법

단면점증법은 모멘트의 재분배와 구조시스템의 비선형 거동을 고려한 2차 비탄성해석에 바탕을 둔 설계방법에 매우 유용한 이산화 최적화 기법이지만 가장 취약한 부재(가장 큰  $\alpha$ 값을 가진 부재)를 찾기 위하여 유효길이계수(K-factor)의 함수인 식(8)을 사용한다. 실제 비선형 거동을 하는 구조물의 유효길이계수를 구하는 것은 매우 어려운 문제이다. 실제 설계에서 탄성 이론에 근거한 유효길이계수를 사용하고 있으며, 비탄성좌굴을 고려하기 위하여 강성도 감소계수(Stiffness reduction factor)를 사용하고 있다. 또한, 유효길이계수를 구하기 위하여 다음과 같이 복잡한 계산과정을 필요로 한다.

(1) 기둥부재의 절점 A단에서  $\sum E_c I_c / L_c =$  모든 기둥의 강성도의 합과  $\sum E_g I_g / L_g =$  모든 거더의 강성도의 합을 구하여 보-기둥에 대한 강성비  $G_A$ 를 계산한다.

(2) 기둥부재의 절점 B단에서  $\sum E_c I_c / L_c =$  모든 기둥의 강성도의 합과  $\sum E_g I_g / L_g =$  모든 거더의 강성도의 합을 구하여 보-기둥에 대한 강성비  $G_B$ 를 계산한다.

(3) 만약 기둥부재의 한 절점이 핀지점인 경우 이론적으로  $G = \infty$ 이지만 AISC-LRFD에서 추천하고 있는  $G = 10.0$ 으로 가정하며, 고정지점인 경우에는 이론적으로  $G = 0.0$ 이지만  $G = 1.0$ 으로 가정한다.

(4) 구조물의 횡방향 변위가 방지되어 있는가 여부를 판별하여 횡방향 변위가 방지되어 있는 경우에는 식(11)을, 횡방향 변위가 방지되어 있지 않는 경우에는 식(12)를 사용하여 유효길이계수를 구한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 식(8)에서 사용된 공칭 압축강도  $P_n$  대신 항복강도  $P_y$ 를 사용함으로써 유효길이계수가 필요없는 수정된 단면점증법을 개발하였습니다. 즉, 가장 취약한 부재 선택시 사용되는 식(8) 대신에 유효길이계수 계산이 필요없는 식(14)을 사용하여 최적화를 수행하였다. 수정된 단면점증법은 기존의 단면점증법에 비하여 유효길

이계수를 계산해야 하는 불필요한 복잡한 과정을 생략할 수 있어 설계자의 노력과 시간을 절감할 수 있으며, 또한, 유효길이계수를 계산하기 힘든 구조물에도 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서 사용한 최적화 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었다.

$$(1) \frac{P}{P_y} \geq 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8}{9} \frac{M}{M_p} \quad (14a)$$

$$(2) \frac{P}{P_y} < 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$\alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M}{M_p} \quad (14b)$$

여기서  $P_y$ 는 항복강도,  $M_p$ 는 소성 휨모멘트를 나타낸다.

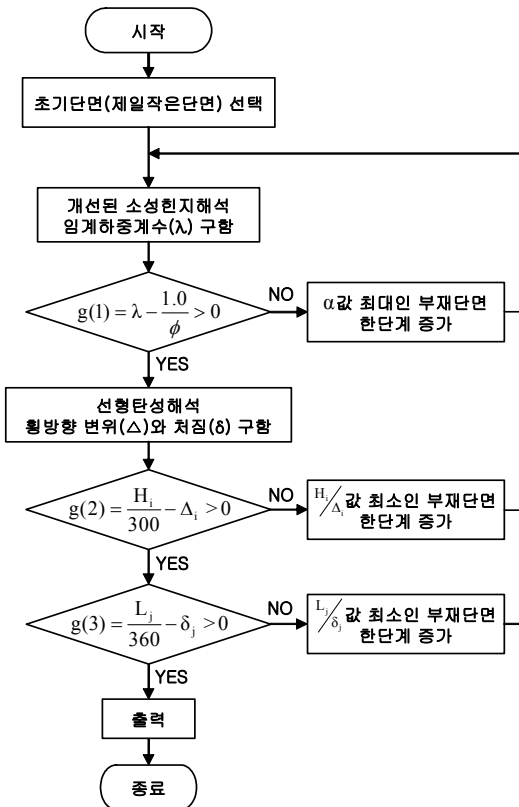


Fig. 1 최적화 알고리즘

### 3.2 목적 함수

목적함수는 강골조 구조물의 중량을 사용하였으며 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$OBJ = \rho \left[ \sum_{i=1}^{NC} (V_c)_i + \sum_{j=1}^{NB} (V_b)_j \right] \quad (15)$$

여기서,  $(V_c)_i$ 는  $i$ 번째 기둥의 체적,  $(V_b)_j$ 는  $j$ 번째 보의 체적,  $NC$ 는 기둥의 개수,  $NB$ 는 보의 개수이다.  $\rho$ 는 단위 체적당 중량이다.

### 3.3 제약조건식

본 논문에서는 구조물의 하중-저항능력에 대한 제약조건식과 사용성에 대한 제약조건식을 고려하였다. 하중-저항능력에 대한 제약조건은 하중계수를 고려한 설계하중에 대하여 2차 비탄성해석을 실시하여 구조물의 파괴기구가 형성되었을 때의 임계하중과 설계하중의 비를 나타내는 임계하중계수( $\lambda$ )에 기초하여 식(16)과 같이 정식화하였다.

$$g(1) = \lambda - \frac{1.0}{\phi} > 0 \quad (16)$$

여기서  $\phi$ 는 구조시스템에 대한 강도감소계수로서 본 연구에서는 0.9를 사용하였다. 사용성에 대한 제약조건은 횡방향 변위에 대한 제약조건과 처짐에 대한 제약조건을 고려하였으며, 식(17)과 식(18)과 같이 제약조건식을 형성하였다.

$$g(2) = \frac{H_i}{300} - \Delta_i \geq 0 \quad (17)$$

$$g(3) = \frac{L_j}{360} - \delta_j \geq 0 \quad (18)$$

식(17) 및 식(18)은 각각 횡방향 변위 및 처짐에 대한 제약조건식이다.  $H_i$  및  $\Delta_i$ 는  $i$ -번째 기둥의 층고 및 층간 수평변위를 나타낸다.  $L_j$  및  $\delta_j$ 는  $j$ -번째 보의 시간길이 및 처짐을 나타낸다.

#### 4. 설계예제

본 논문에서는 설계예제로서 Fig. 2와 같은 2층 3경간 평면 강골조 구조물을 사용하였다. 2층 3경간 평면 강골조 구조물은 Schinler(2000) 및 윤영묵과 김병현(2004)에 의하여 설계된 바 있다. 설계에 사용된 하중은 계수하중조합  $1.2DL+1.6LL+0.8WZ$  과 사용하중조합  $1.0DL+1.0LL+1.0WZ$ 을 사용하였다. 여기서,

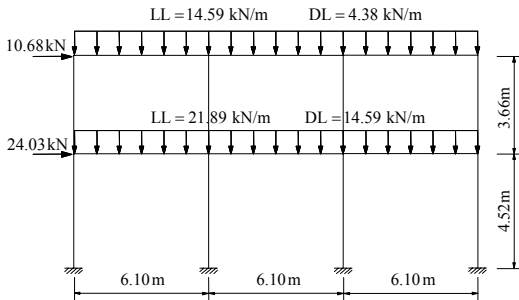


Fig. 2 2층 3경간 평면 강골조 구조물

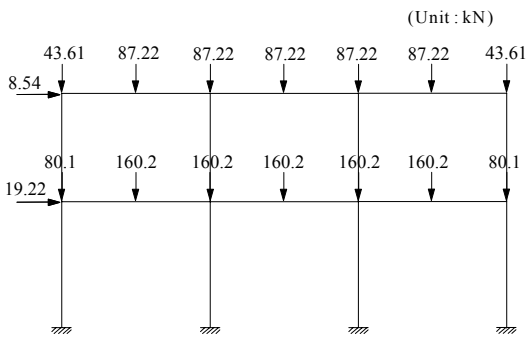


Fig. 3 등가계수하중

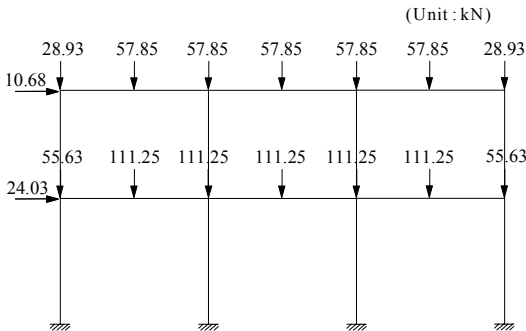


Fig. 4 등가사용하중

$DL$ 은 사하중,  $LL$ 은 활하중,  $WZ$ 은 풍하중이다. 각 구조물에 작용시킨 등가계수하중을 Fig. 3에, 등가사용하중을 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 각 부재의 단면을 6개의 설계그룹으로 선택하여 단면을 설계하였으며, 설계그룹에 따른 설계변수를 Fig. 5에 나타내었다. 항복응력은 250 MPa(36 ksi), 탄성계수는 200,000 MPa(29000 ksi)를 사용하였으며, 기둥길이의 1/500에 해당하는 비수직도를 채택하여 기하학적 불완전성을 고려하였다.

최적설계된 구조물에 대한 하중-변위 곡선을 Fig. 6에서 보여 주고 있다. 2차 비탄성해석에 의한 구조물의 하중-저항능력은 임계하중과 설계하중의 비를 나타내는 임계하중계수( $\lambda$ )가 1.127에 이를 때 극한 상태에 도달하였다. 따라서, 구조시스템의 안전율 0.9을

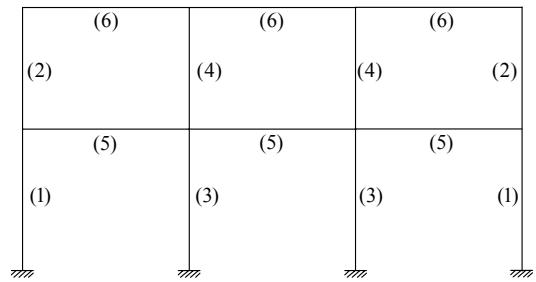


Fig. 5 설계변수

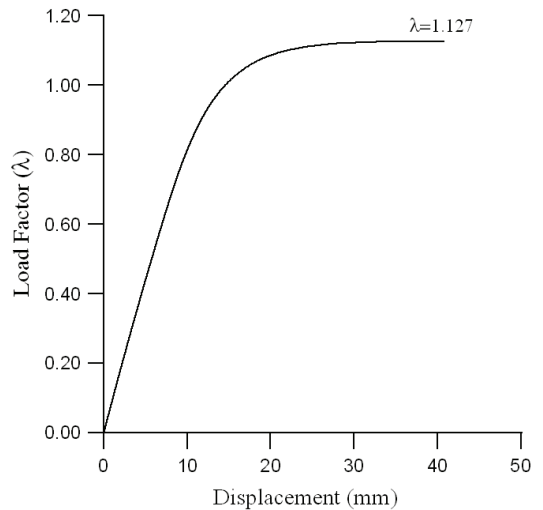


Fig. 6 하중-변위 곡선

Table 1 3층 2경간 평면 강뼈대 구조물의 최적설계 결과

부재종류	설계변수	Schinler(2000)	윤영목과 김병현(2004)	제안된 방법	
				기존의 단면점증법	수정된 단면점증법
기둥	1	W10×49	W8×31	W12×26	W4×13
	2	W10×49	W8×31	W12×22	W4×13
	3	W8×40	W12×40	W16×40	W12×22
	4	W8×40	W8×28	W12×22	W8×13
보	5	W14×22	W16×26	W12×26	W16×26
	6	W12×16	W12×19	W12×16	W12×19
총중량		31.52 kN (7,086 lb)	27.78 kN (6,246 lb)	24.71 kN (5,556 lb)	19.46 kN (4,374 lb)
하중저항능력		1.03	1.333	1.166	1.127
비선형해석수		2,500 회	7,500 회	39 회	19 회

고려한 구조물에 대한 극한 하중비는 1.014이 된다. 극한 하중비가 1.0보다 크므로, 선택한 단면을 사용하는 것이 적절함을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대 수평변위는 H/355(12.88 mm)로 계산되었다. 이는 허용 수평변위인 H/300(15.24 mm)보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다. 사용하중에 의한 거더의 최대처짐은 L/428(14.23 mm)로 계산되었다. 이는 처짐 허용치인 L/360(16.93 mm)보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다.

최적설계결과를 Schinler(2000)의 연구결과 및 윤영목과 김병현(2004)의 연구결과와 비교하여 Table 1에 제시하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한 수정된 단면점증법을 사용했을 경우 최적설계된 구조물의 총중량은 19.46 kN(4,374 lb)로서, Schinler의 최적설계 결과인 31.5 kN(7,086 lb)보다 38.2% 정도, 윤영목과 김병현(2004)의 최적설계 결과인 27.78 kN(6,246 lb)보다 29.9% 정도, 기존의 단면점증법에 의한 최적설계 결과인 24.71 kN(5,556 lb)보다 21.2% 정도 구조물의 중량감소 효과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 방법이 최적화 기법으로 매우 우수함을 알 수 있었다.

Schinler(2000)과 윤영목과 김병현(2004)은 최적해를 구하기 위하여 유전자 알고리즘을 사용하였다. Schinler는 집단수를 50, 세대수를 50을 사용하였으며, 윤영목과 김병현은 집단수를 50, 세대수를 50, 난수발생을 3회 실행하여 해를 구하였다. 결국 Schinler은 최적해를 구하기 위해서 2,500회의 비선형 해석을,

윤영목과 김병현은 7,500회의 비선형 해석을 수행해야 한다. 비선형 해석을 1회 하는 데 걸리는 시간을 30초만 잡더라도 Schinler는 20.8시간, 윤영목과 김병현은 62.5시간이 필요하게 된다. 그러나, 기존의 단면점증법에서는 39회만으로 최적해를 구할 수 있었으며, 수정된 단면점증법에서는 19회만으로 최적해를 구할 수 있었다. 결국 본 연구에서 제안한 수정된 단면점증법을 최적화 기법으로 사용할 경우 해석시간에 있어서 Schinler이 제시한 방법보다 131.6배, 윤영목과 김병현이 제시한 방법보다 394.7배 정도, 기존의 단면점증법보다 2.05배 정도 해석시간을 절감할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제시한 방법이 최적화 기법으로 매우 효과적임을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 2차 비탄성해석과 단면점증법을 이용하여 강골조 구조물의 최적설계를 수행하였다. 2층 3경간 평면 강골조 구조물에 대하여 예제해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수정된 단면점증법은 복잡한 유효길이계수 계산과 정을 생략함으로써 기존의 단면점증법의 문제점을 해결하였다.
- 2) 수정된 단면점증법으로 최적설계된 강골조 구조물의 중량은 Schinler의 최적설계 결과보다 38.2% 정도, 윤영목과 김병현의 최적설계 결과보다 29.9% 정도, 기존의 단면점증법보다 21.2% 정도 중량감소 효과를 얻을 수 있었다.



- 3) 수정된 단면집중법을 사용했을 경우 해석시간은 Schinler의 최적설계 방법보다 131.6배 정도, 윤영목과 김병헌의 최적설계 방법보다 394.7배, 기존의 단면집중법보다 2.05배 정도 해석시간을 줄일 수 있었다.
- 4) 제안된 설계방법은 다른 연구자들이 제안한 최적화 기법에 비하여 해석시간 절감에 따른 효율성 뿐만 아니라 강제 비용절감에도 매우 우수함을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. 박문호, 김승억, 최세휴, "3차원 강뼈대 구조물의 실용적인 고등해석기법 개발", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권 1-A호, 2000, pp. 69-76.
2. 윤영목, 김병헌, "2차 비탄성해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 최적설계", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권 1-A호, 2004, pp. 87-100.
3. AISC, "Load and resistance factor design specification", 2nd ed., AISC, Chicago. 1993.
4. Chen, W.F. and Kim, S.E., LRFD, "steel design using advanced analysis", CRC Press, Boca Raton, Florida. 1997.
5. Chen, W.F. and Lui, E.M., "Stability design of steel frames", CRC Press. 1992.
6. Choi, S.H. and Kim, S.E., "Optimal design of steel frame using practical nonlinear inelastic analysis", Engineering Structures, Vol. 24, 9, 2002, pp. 1189-1201.
7. Dumonteil, P. "Simple equations for effective length factors". Engineering Journal, AISC, 29(3), 1992, pp. 111-115.
8. Kim, S.E. and Chen, W.F., "Practical advanced analysis for braced steel frame design", J. Struct. Engrg., ASCE, 122(11), 1996a, pp. 1266-1274.
9. Kim, S.E. and Chen, W.F., "Practical advanced analysis for unbraced steel frame design", J. Struct. Engrg., ASCE, 122(11), 1996b, pp. 1259-1265.
10. Liew, J.Y. and Tang, L.K., "Nonlinear refined plastic hinge analysis of space frame structures", Research Report No. CE027/98, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore. 1998.
11. Pezeshk, S., Camp, C.V. and Chen, D., "Design of nonlinear framed structures using genetic optimization", J. Struct. Eng., ASCE, 126(3), 2000, pp. 382-388.
12. Schinler, D., "Design of partially restrained steel frames using advanced analysis and objected-oriented evolutionary algorithm", MS Thesis, Marquette University, Milwaukee, WI. 2000.

(접수일자 : 2008년 3월 19일)  
(심사완료일자 : 2008년 7월 7일)