

비선형 해석을 이용한 강뼈대구조물의 자동화설계

Automatic Design of Steel Frame Using Nonlinear Analysis

김 창 성¹⁾ 마 상 수²⁾ 김 승 역³⁾
Kim, Chang Sung Ma, Sang Soo Kim, Seung Eock

ABSTRACT

[An automatic design method of steel frames using nonlinear analysis is developed. The geometric nonlinearity is considered by the use of stability functions. A direct search method is used as an automatic design technique. The unit value of each member is evaluated by using LRFD interaction equation. The member with the largest unit value is replaced one by one with an adjacent larger member selected in the database. The weight of the steel frame is taken as an objective function. Load-carrying capacities, deflections, interstory drifts, and ductility requirement are used as constraint functions. Case study of a three-dimensional two story frame are presented.

1. 서 론

기존의 강뼈대 구조물의 자동화설계에서는, 구조물이 비선형 거동을 함에도 불구하고 선형해석을 하는 불합리성을 내포하고 있다. 또한 유효길이계수를 1.0로 가정하여 강도 검토를 하므로써 구조물의 강도가 과소 혹은 과대평가되는 문제가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하는 자동화 설계기법을 개발하였다. 즉, 비선형 해석을 수행하고 강도검토시 유효길이계수를 합리적으로 반영하였다. 안정함수(Stability Function)를 사용하므로써 비선형성을 고려한다.⁽¹⁾ 자동화 기법으로는 직접탐색법을 사용한다. 직접탐색법은 LRFD의 상관관계식으로 계산된 값중 최대값을 가지는 부재의 단면을 데이터 파일에 저장된 단면들 중에서 단계별로 하나씩 증가시키는 방법이다. 목적함수로는 구조물의 중량을 사용하였으며, 제약조건으로는 하중저항능력과 처짐, 층간 수평변위 및 연성도를 고려한다.

1) 세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소·석사과정
2) 세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소·석사과정
3) 정희원·세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소·부교수

2. 실용적인 비선형 해석

기하학적인 비선형성을 고려하기 위하여 안정함수를 사용한다. 안정함수란 축방향력에 의하여 휨 강성이 감소하는 영향을 고려하는 함수이다.⁽¹⁾ 3차원 보-기둥 부재의 힘-변위 관계는 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_1 \frac{EI_y}{L} & S_2 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 \frac{EI_y}{L} & S_1 \frac{EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_3 \frac{EI_z}{L} & S_4 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_4 \frac{EI_z}{L} & S_3 \frac{EI_z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI}{L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{yA} \\ \theta_{yB} \\ \theta_{zA} \\ \theta_{zB} \\ \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, P , M_{yA} , M_{yB} , M_{zA} , M_{zB} 및 T 는 축력, y 와 z 축에 대한 단모멘트 및 비틀림모멘트를 각각 나타낸다. δ , θ_{yA} , θ_{yB} , θ_{zA} , θ_{zB} 및 ϕ 는 축변형, 절점의 회전각 및 비틀림각이다. S_1 , S_2 , S_3 와 S_4 는 각각의 y 와 z 축에 대한 안정 함수로서 식 (2a) ~ 식 (2d) 와 같다.

$$S_1 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2 \rho_y \cos(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})} & : P < 0 \\ \frac{\pi^2 \rho_y \cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} & : P > 0 \end{cases} \quad (2a)$$

$$S_2 = \begin{cases} \frac{\pi^2 \rho_y - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi\sqrt{\rho_y} \sin(\pi\sqrt{\rho_y})} & : P < 0 \\ \frac{\pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y}) - \pi^2 \rho_y}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_y}) + \pi\sqrt{\rho_y} \sinh(\pi\sqrt{\rho_y})} & : P > 0 \end{cases} \quad (2b)$$

$$S_3 = \begin{cases} \frac{\pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi^2 \rho_z \cos(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2\cos(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z} \sin(\pi\sqrt{\rho_z})} & : P < 0 \\ \frac{\pi^2 \rho_z \cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) - \pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z})}{2 - 2\cosh(\pi\sqrt{\rho_z}) + \pi\sqrt{\rho_z} \sinh(\pi\sqrt{\rho_z})} & : P > 0 \end{cases} \quad (2c)$$

$$S_4 = \begin{cases} \frac{\pi^2 \rho_z - \pi \sqrt{\rho_z} \sin(\pi \sqrt{\rho_z})}{2 - 2 \cos(\pi \sqrt{\rho_z}) - \pi \sqrt{\rho_z} \sin(\pi \sqrt{\rho_z})} : P < 0 \\ \frac{\pi \sqrt{\rho_z} \sinh(\pi \sqrt{\rho_z}) - \pi^2 \rho_z}{2 - 2 \cosh(\pi \sqrt{\rho_z}) + \pi \sqrt{\rho_z} \sinh(\pi \sqrt{\rho_z})} : P > 0 \end{cases} \quad (2d)$$

여기서 $\rho_y = P/(\pi^2 EI_y/L^2)$, $\rho_z = P/(\pi^2 EI_z/L^2)$ 이다.

3. 자동화 설계

3.1 알고리즘

본 연구에서 사용한 직접탐색법의 알고리즘은 그림 1과 같다.

3.2 목적 함수

목적함수는 강빔대 구조물의 중량의 함수로서 식 (3)과 같다.

$$OBJ = \rho \left[\sum_{i=1}^{NB} (V_b)_i + \sum_{j=1}^{NC} (V_c)_j \right] \quad (3)$$

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

3.3 제약 조건식

하중-저항 능력

보-기둥 부재에 대한 하중-저항능력은 AISC-LRFD⁽²⁾ 상관방정식을 사용하였으며 제약조건식은 다음과 같다.

$$\frac{P}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$G(1) = \frac{P}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_y}{\phi_b M_{ny}} + \frac{8}{9} \frac{M_z}{\phi_b M_{nz}} \leq 1.0 \quad (4a)$$

$$\frac{P}{\phi_c P_n} < 0.2 \text{ 인 경우}$$

$$G(1) = \frac{P}{2\phi_c P_n} + \frac{M_y}{\phi_b M_{ny}} + \frac{M_z}{\phi_b M_{nz}} \leq 1.0 \quad (4b)$$

여기서, ϕ_c 및 ϕ_b 는 압축 및 휨에 대한 강도감소계수이다. AISC-LRFD⁽²⁾에서는 저항계수로 부재의 축강도 및 휨강도에 대하여 각각 0.85 및 0.9를 사용하고 있다. P , M_y 및 M_z 는 각각 축력, y 및 z 축에 대한 휨모멘트이다. M_{ny} 및 M_{nz} 는 y 및 z 축에 대한 단면의 공칭 휨강도이다. 본 연구에서 사용하는 단면은 조밀단면으로 가정하였기 때문에 단면의 소성 휨모멘트를 공칭 휨강도로 사용한다. P_n 은 공칭 압축강도로서 다음식과 같다.

$$\lambda_c \leq 1.5 \text{ 인 경우} \quad P_n = 0.658 \lambda_c^2 F_y A \quad (5a)$$

$$\lambda_c > 1.5 \text{ 인 경우} \quad P_n = \frac{0.877 F_y A}{\lambda_c^2} \quad (5b)$$

여기서, λ_c 는 세장비로서 식(6)과 같다.

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (6)$$

또한, F_y 및 E 는 항복강도 및 탄성계수이다. A 및 L 은 부재의 단면적 및 길이이다. r 은 좌굴면에 대한 회전반경이다. K 는 부재의 유효길이계수로서 Dumonteil⁽³⁾가 제안한 식을 사용한다.

$$\text{항 변위가 방지된 경우} \quad K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (7a)$$

$$\text{항 변위가 있는 경우} \quad K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4.0(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (7b)$$

여기서, G_A 및 G_B 는 기둥 단부 A 및 B에서 보-기둥에 대한 강성비를 나타낸다.

변위

Ad Hoc 위원회⁽⁴⁾에 의한 층의 처짐 제한은 다음과 같다.

$$G(2) = \frac{L_i}{360} - (\Delta_{bu})_i \geq 0 \quad (8a)$$

$$G(3) = \frac{H_j}{300} - (\Delta_{cw})_j \geq 0 \quad (8b)$$

여기서 G(2) 및 G(3)은 각각 처짐 및 층변위에 대한 제약조건식이다. L_i 및 $(\Delta_{bw})_i$ 는 i-번째 보의 지간길이 및 처짐을 나타낸다. H_j 및 $(\Delta_{cw})_j$ 는 j-번째 기둥의 층고 및 층간 수평변위를 나타낸다.

연성도

횡지 길이와 조밀단면에 대한 제한은 AISC-LRFD⁽²⁾의 규정에 따른다.

$$G(4) = \frac{300r_{yi}}{\sqrt{F_y}} - L_{bi} \geq 0 \quad (9a)$$

$$G(5) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)_i \geq 0 \quad (9b)$$

$$G(6) = \frac{640}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{h_c}{t_w} \right)_i \geq 0 \quad (9c)$$

여기서 G(4)는 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위한 비지지장에 대한 제약조건식이다. G(5) 및 G(6)는 국부좌굴을 방지하기 위한 플랜지 및 웨브의 폭-두께비에 대한 제약조건식이다. r_{yi} 및 L_{bi} 는 i-번째 부재에 대한 압축 방향의 회전반경 및 비지지장을 나타낸다. b_f , t_f 및 t_w 는 각각 플랜지의 폭과 두께 및 웨브의 두께를 나타낸다. h_c 는 보의 깊이, F_y 는 항복강도를 나타낸다.

4. 설계 예제

본 설계 예제는 3차원 2층 강뼈대 구조물로서 그림 2에 도시하였다. 부재의 크기를 나타내는 설계변수는 그림 3에 나타내었다. 각 부재의 항복강도는 250 MPa이고, 탄성계수는 200 Gpa이다. 구조물에 작용하는 설계하중은 다음과 같다. (1) 지붕하중 : 사하중 10.8 kN/m², 활하중 7.2 kN/m², (2) 바닥하중 : 사하중 13.2 kN/m², 활하중 12.0 kN/m², (3) 풍하중 7.2 kN/m²를 사용하였다. 하중조합은 1.2D+0.5L+1.3W를 사용하였다. 하중조합을 고려한 설계하중은 등가집중하중으로 환산하여 재하시켰으며 그림 10에 도시하였다. 초기 부재 크기는 가장 가벼운 단면인 W4×13을 사용하였다. 부재의 크기는 구조물이 제약조건식을 모두 만족할 때까지 단계별로 하나씩 증가된다. 활하중에 의한 최대처짐은 L/1091로 계산되었다. 이는 처짐 허용치인 L/360보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대 층간 수평변위는 H/327로 계산되었다. 이는 허용 수평변위인 H/300보다 작으므로 기준치를 만족함을 알 수 있다. 제안된 방법에 의한 단면크기와 상관계수 G(1)을 표 1에 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형 해석을 이용한 3차원 강뼈대 구조물의 자동화 설계 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제안한 해석 방법은 기하학적 비선형 효과를 정확하게 고려할 수 있다.
- (2) 제안한 방법은 자동화 설계시 유효길이계수를 적절히 반영하므로써 강도를 정확히 평가할 수 있다..
- (3) 제안한 방법은 실용적인 비선형 해석에 자동화 기법을 도입한 방법으로 설계자의 노력과 시간을 대폭 절감할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(M10204000143-02J0000-12910)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chen, W.F. and Kim, S.E.(1997), LRFD steel design using advanced analysis, CRC Press, Boca Raton, Florida.
2. AISC, Load and resistance factor design specification (1993), AISC, 2nd ed., Chicago.
3. Dumonteil, P.(1992), Simple equations for effective length factors, Engineering Journal, AISC, 29(3), Third Quarter, pp.111-115.
4. Ad Hoc Committee on Serviceability, Structural serviceability(1986): a critical appraisal and research needs, ASCE J. Struct. Eng., 112(12), pp.2646-2664.

표 1. 부재크기와 상관계수 값

설계 변수	부재 크기	상관 계수 값
1	W30 × 116	0.82
2	W40 × 183	0.93
3	W24 × 76	0.82
4	W24 × 68	0.85
5	W16 × 40	0.98
6	W8 × 15	0.87
7	W12 × 19	0.96
8	W12 × 26	0.90
9	W8 × 13	0.80
10	W12 × 16	0.92
진체 중량	114.78 kN	

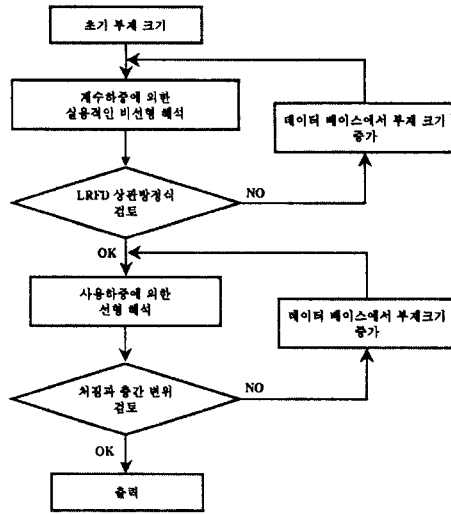


그림 1. 알고리즘

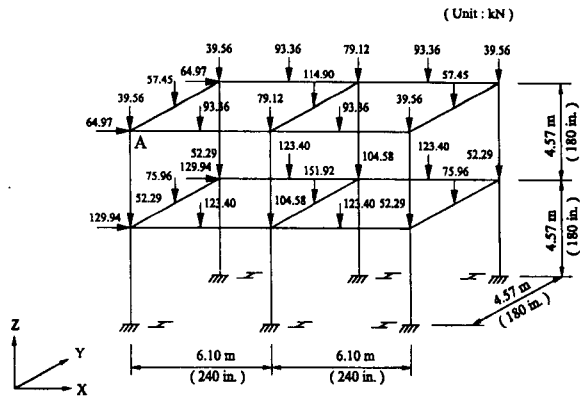


그림 2. 3차원 2층 강뼈대 구조물

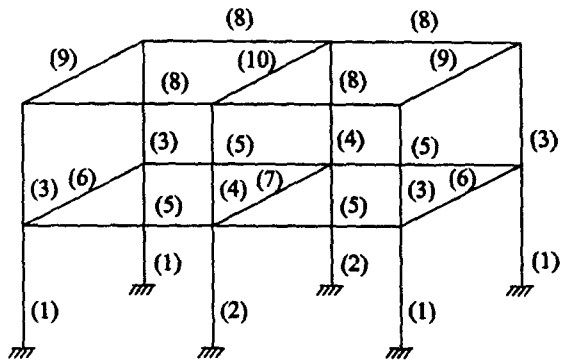


그림 3. 3차원 2층 강뼈대 구조물의 설계변수