

2차 탄성해석법에 의한 강뼈대 구조물의 최적설계

An Optimum Design of Steel Frames by Second Order Elastic Analysis

박 문 호*

Park, Moon-Ho

장 준 호**

Chang, Chun-Ho

김 기 욱***

Kim, Ki-Wook

Abstract

The main objective of this study is to develop an optimization algorithm of framed structures with rigid and various semi-rigid connections using the multilevel dynamic programming and the sequential unconstrained minimization techniques (SUMT). The second-order elastic analysis is performed for steel framed structures. The second order elastic analysis is developed based on nonlinear beam-column theory considering the bowing effect. The following semi-rigid connections are considered; double web angle, top-seat angle and top-seat angle with web angle. We considered the three connection models, such as modified exponential, polynomial and three parameter model. The total weight of the structural steel is used as the objective function in the optimization process. The dimensions of steel cross section are selected as the design variables. The design constraints consist of strength requirements for axial, shear and flexural resistance and serviceability requirements.

요 지

본 연구의 목적은 다단계 동적계획법 및 축차무제약 최소화기법을 이용하여 강접 및 다양한 반강접 접합부 모델을 가진 뼈대 구조물의 최적화 알고리즘을 개발하는데 있다. Bowing effect를 고려한 비선형 보-기둥이론을 사용하였으며, 보-기둥의 접합부는 반강접접합부인 양면 복부앵글을 가진 접합부, 상·하플랜지 접합부, 양면복부앵글을 가진 상·하플랜지 접합부를 고려하여 연구를 수행하였으며, 각 접합부의 해석 모델은 수정된 지수모델, 다항식 모델, 파워모델을 사용하였다. 최적화문제에 있어서 목적함수는 강재의 중량을 취하였으며, 설계변수는 부재의 단면치수를 선택하였다. 설계제약조건은 축력, 전단력 및 휨모멘트의 저항성과 사용성에 대해 수식화하였다. 본 연구에서 개발된 기하학적 비선형을 고려한 2차 탄성해석법을 이용하여 강접 및 다양한 모델을 가진 반강접 강뼈대 구조물의 종합적인 연속 최적설계 프로그램을 개발하였다.

Keywords : Optimization, Second-order Elastic Analysis, Semi-rigid, Steel Structures, Bowing Effect

핵심 용어 : 최적화, 2차탄성해석, 반강접, 강골조, 보잉 효과

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 계명대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

*** 정회원, Post-Doc. The Ohio-state University, 공학박사

E-mail : parkmh@knu.ac.kr 053-950-5608

•본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

골조구조물의 해석에 있어 실제구조물의 응답과 차이를 갖게 되는 하나의 요소가 접합부라 할 수 있다. 접합부는 부재의 모멘트 분포 및 횡변위에 영향을 주어 구성부재들의 강성도를 결정하는 중요한 요소이다. 하지만 이 접합부를 해석상의 편의를 위해 강접 또는 핀접합으로 이상화하여 다루어 왔는데 이는 접합부의 거동을 정확하게 나타낼 수 없으며, 이로 인하여 전체 구조물의 응답이나 안정성 또한 부정확해질 수밖에 없다. 실무에서 많이 쓰이고 있는 볼트로 체결된 접합부는 대부분이 강접과 핀접합의 중간정도 회전능력을 가진 반강접 접합부이다. 반강접 접합부의 거동에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 이를 이용한 최적설계에 관한 연구는 잘 이루어지지 않고 있다. 또한 기존의 대부분의 실무에서 광범위하게 쓰여지고 있는 탄성해석을 지칭하는 1차해석은 구조물의 초기 기하학적 변위를 고려하지 않고 평형방정식을 구성하여 실제적인 구조물의 정확한 강도와 안정성을 판단하기 어려운 단점이 있다. 이를 시방서에선 B_1 , B_2 확대계수를 이용하여 2차효과를 고려하도록 하고 있으나 이를 정확하게 반영하기엔 한계가 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 그래서 기하학적 비선형을 고려한 2차해석을 이용한 최적 설계연구가 필요하다.

그래서, 본 연구에서는 2차탄성해석법에 의한 구조해석과 반강접 접합부의 특성을 고려한 수정된 지수모델, 다항함수식 모델 및 먹급수 모델로 선정된 각 변수들을 선정하여 반강접부대구조물의 거동에 대해 해석 및 최적설계를 수행하였다. 특별히 해석시 Bowing effect를 고려해봄으로써 최적설계에 미치는 영향을 고찰해 보았다. 또한 기존의 최적설계는 기둥의 유효길이 계수를 자동적으로 계산치 못하고 1로 가정하거나 사용자가 일일이 산정하여 입력하여야 하는 문제점이 있었다. 이를 본 연구에서는 도표를 이용하지 않고 K값을 산정할수 있는 Dumonteil 제안식을 이용해 자동적으로 유효길이계수를 산정하도록 알고리즘을 제안하였다.⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾ 설계를 위한 시방규정은 하중저항계수 설계시방서 AISC-LRFD 1994를 사용하였다. 최적화 기법은 프로그램의 메모리를 최적화하면서 빠른 프로그램 실행의 장점을 가진 다단계동적계획법을 이용

하였다.

2. 2차 탄성 해석법에 의한 요소해석

다음절에서는 본 연구에서 이용한 기하학적 비선형을 고려한 2차 탄성해석, 기둥의 유효길이계수산정법, 반강접 모델식에 대해 간략히 설명하고자 한다.

2.1 2차 탄성해석

2차 탄성해석법에 대한 미분방정식은 가상일의 원리에서 얻어질 수 있다. 이 방정식은 수학적인 논리에 의해 적합조건에 의해 평형방정식으로 유도될 수 있다. Fig. 1은 변형이 발생전 부재의 축에 수직으로 작용하는 등분포하중, P_y 를 받는 보를 나타내고 있다.

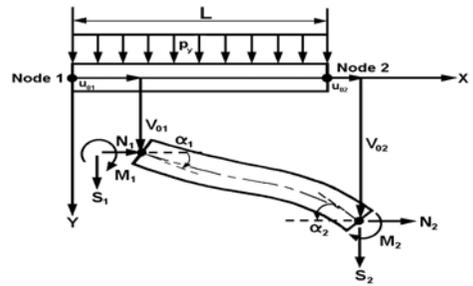


Fig. 1 부재의 좌표계

식(1)의 변형률-변위관계식은 평면 프레임에 대한 2차 유한요소해석법에서 일반적으로 사용되어진다.

$$e_{xx} = \frac{du_o}{dx} - y \frac{d^2v_o}{dx^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{dv_o}{dx} \right)^2 \quad (1)$$

Fig. 1에서 외부하중과 변위의 관계와 대응하는 응력을 이용하여 식(1)의 변형률 텐서 e_{xx} 에 평면 프레임의 가상일의 원리를 적용하면 식(2)와 식(3)과 같다.

$$\delta \Pi = \int_0^L \int_A \sigma_{xx} \delta e_{xx} dA dx - \int_0^L p_y \delta v_o dx - [n_x(N_i \delta u_{oi} + S_i \delta v_{oi} + M_i \delta \alpha_{oi})]_1^2 = 0 \quad (2)$$

$$N = \int_A \sigma_{xx} dA, \quad M = \int_A \sigma_{xy} dA \quad (3)$$

여기서 $\int_A dA$ 는 단면적의 적분식, $\int_L dx$ 는 부재의 길이에 대한 적분식이고, n_x 는 절점 1, 2에서 -1 또는 1의 값을 가진다. 식(4a,b)는 비선형 보-기둥이론으로서 곡률수축에 의한 효과를 나타내고 있다.

$$N = EA[u_o' + \frac{1}{2}(v_o')^2] \quad (4a)$$

$$M = -EIv_o'' \quad (4b)$$

Bowing Effect가 무시되면 선형화된 보-기둥이론으로 식(5)과 같이 간략화 된다.

$$N = EAu_o' \quad (5)$$

2.2 유효길이계수

기둥설계에서 유효길이 계수(K값)산정에 있어 기존 시방서에서 제시하고 있는 alignment chart를 이용하는 방법은 번거롭고 까다로운 작업이며, 이를 해석과 설계를 자동적으로 수행하기 위한 프로그래밍하는 작업은 많은 어려움이 따른다. 설계시의 편의를 위해 K값을 1로 가정할 경우 기둥의 강성이 과대평가하게 되어 브레이싱 안된 구조물인 경우 과소설계를 하게 된다. 그래서, 본 연구에서는 alignment chart를 이용하는 대신 Dumontel⁽⁸⁾가 제안한 유효길이계수의 간단한 산정식을 사용하였다. 브레이스된 경우와 안된 경우의 유효길이 계수에 관한 식은 다음과 같다.

① 브레이스된 구조물

$$K = \frac{3G_iG_j + 1.4(G_i + G_j) + 0.64}{3G_iG_j + 2.0(G_i + G_j) + 1.28} \quad (6)$$

② 브레이스 되지 않은 구조물

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_iG_j + 4.0(G_i + G_j) + 7.5}{G_i + G_j + 7.5}} \quad (7)$$

$$G = \frac{(EI/L)_c}{(EI/L)_b}$$

여기서, EI 와 L 은 보와 기둥의 강성도 및 길이, i, j 는 부재의 절점을 나타낸다.

2.3 접합부의 모델식

많은 실험을 통해 제시된 반강접 접합부의 모멘트-회전거동의 예측모델중에서 본 연구에 이용한 다항식 모델, 멱급수모델, 지수모델에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾

a) 다항식 모델식

Frye-Morris는 Sommer가 제시한 예측모델방법을 이용하여, 7가지 형태의 반강접 보-기둥 회전거동을 나타내었다. 이 모델은 접합부의 모멘트-회전거동에 대한 곡선식을 식(8)와 같은 홀수차항의 다항식형태로 구성하였다.

$$\theta_r = C_1(KM) + C_2(KM)^3 + C_3(KM)^5 \quad (8)$$

여기서 K 는 반강접 보-기둥 접합부를 이루는 설계 변수들의 회전거동에 대한 영향을 나타내는 매개변수이고, C_1, C_2, C_3 는 곡선 추적을 위한 상수이다.

b) 멱급수 모델식

Kishi와 Chen은 보다 간편한 접합부 해석방법을 고안하여 다음과 같은 3개의 매개변수를 갖는 멱급수(Power)모델을 제시하였다.

$$\theta_r = \frac{M}{K_i \left[1 - \left(\frac{M}{M_u} \right)^n \right]^{1/n}} \quad (9)$$

여기서 K_i 는 접합부의 초기강성이고, M_u 는 접합부의 극한모멘트, 그리고 n 은 모멘트-회전거동 관계의 형태를 나타내기 위한 매개변수이다.

c) 지수모델식

Kishi와 Chen⁽⁷⁾은 철골 보-기둥 접합부의 비선형 모멘트-회전거동(M-θ)을 다음과 같은 형태의 수정된 지수모델식을 제시하였다.

$$M = M_o + \sum_{j=1}^m C_j \left\{ \left(1 - \exp \left(- \frac{|\theta_r|}{2j\alpha} \right) \right) \right\} + \sum_{k=1}^n D_k (\theta_r - \theta_k) H[\theta_r - \theta_k] \quad (10)$$

여기서 M 은 실험 모멘트, M_o 는 접합부의 초기 모멘트, C_j 와 D_k 는 함수의 곡선추적 매개변수, α 는 수치의 안정성을 위한 척도계수를 나타낸다. θ_k 는 실험 모멘트-회전곡선에서 선형요소일 때의 k 번째 회전각을 나타내며, $H[\theta]$ 는 θ 가 양(+)의 값일 때는 1, 음(-)의 값일 때는 0의 값을 가지는 Heavyside의 단계함수이다.⁽⁷⁾ 곡선추적 매개변수 C_j , D_k 는 주어진 모멘트-회전관계 데이터를 이용하여 최소자승법으로 결정된다. Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4는 본 연구에서 사용된 반강접 접합부 형상을 나타낸다.

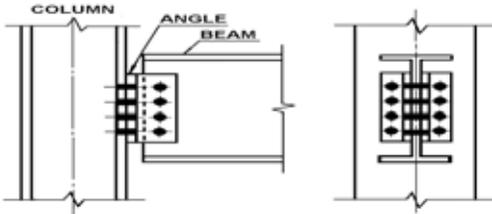


Fig. 2 양면복부앵글 접합부(BW)

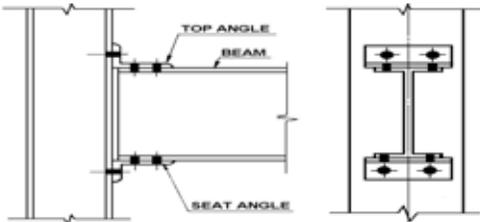


Fig. 3 상·하 플랜지 접합부(TB)

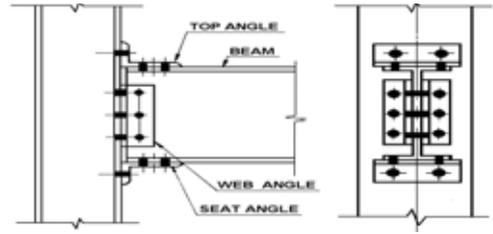


Fig. 4 양면복부앵글을 가진 상·하 플랜지 접합부(BWTB)

3. 강뼈대구조의 최적화

본 연구에서는 최적화를 위한 목적함수로 전체 구조물이 최소중량의 설계가 되도록 강재의 중량함수를 사용하였으며, 설계를 위한 제약조건으로는 하중저항계수설계법(LRFD) 1994 Code를 기준으로 하여 축력과 휨, 전단 및 여러가지 단면형상, 허용충간변위에 대한 제약사항 등을 사용하였다. 최적화기법은 Fig. 5와 같이 최적화의 효율성을 높이기 위해 각 부재별 최적화를 수렴한 후 전체 구조 시스템으로 결정하는 다단계 동적계획기법을 이행하여 이산화 최적화를 수행하였다.

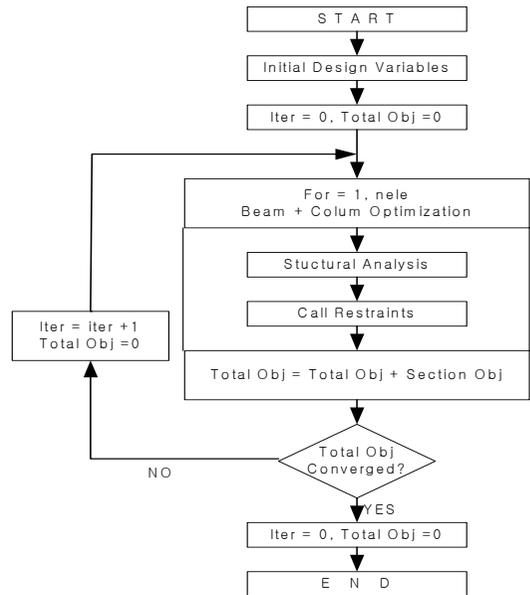


Fig. 5 다단계 동적계획법을 이용한 최적설계 알고리즘

3.1 보의 최적화 문제 형성

보부재에 대한 제약조건식은 다음과 같은 조건을 수식화 하였다.

(1) 보 단면의 폭-두께비 제약조건식

보 단면의 설계는 조밀단면이 되도록 설계하였으며, 따라서 LRFD TABLE B5.1의 규정에 의해 단면 폭-두께비에 관한 제약식인 식(11a)와 식(11b)를 만족하여야만 한다.

$$G_{ij}(1) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (11a)$$

$$G_{ij}(2) = \frac{640}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{d}{t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (11b)$$

(2) 보의 휨모멘트 제약조건식

좌굴이 없이 전체 단면이 소성모멘트를 일으키는 조밀단면이 되도록 LRFD F1-1~F1-14의 규정에 의해 각각 식(12a)와 식(12b)과 같다.

$$L_b = L_p = \frac{300 r_y}{\sqrt{F_y}} \quad (12a)$$

$$G_{ij}(3) = (\phi_b M_n)_{ij} - (M_d)_{ij} > 0 \\ = (0.9 Z_x F_y)_{ij} - (M_d)_{ij} > 0 \quad (12b)$$

여기서, ϕ_b 는 0.90, $(M_d)_{ij}$ 는 i 번째 층 j 번째 보의 단면의 설계모멘트이다.

(3) 보의 전단에 관한 제약조건식

보의 전단강도 제약조건식은 LRFD F2-1~F2-3의 규정에 의해 식(13)와 같다.

$$G_{ij}(4) = (\phi_v V_n)_{ij} - (V_d)_{ij} > 0 \quad (13)$$

여기서, ϕ_v 는 0.90, $(V_d)_{ij}$ 는 i 번째 층 j 번째 보

의 단면의 설계전단력, 그리고 $(\phi_v V_n)_{ij}$ 는 설계전단강도이다.

3.2 기둥의 최적화 문제 형성

(1) 기둥 단면의 폭-두께비 제약조건식

기둥단면의 폭-두께비 제약조건식은 LRFD TABLE B5.1의 규정에 의해 식(14a)와 식(14b)와 같다.

$$G_{ij}(1) = \frac{95}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (14a)$$

$$G_{ij}(2) = \frac{253}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{h_c}{t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (14b)$$

(2) 기둥의 압축 및 압축-휨 강도 제약조건식

기둥의 압축력에 대한 제약조건식은 LRFD E2-1 ~ E2-4의 규정에 의해 식(15)와 같다.

$$G_{ij}(3) = (\phi_c P_n)_{ij} - (P_u)_{ij} > 0 \quad (15)$$

여기서, ϕ_c 는 0.85, $(P_u)_{ij}$ 는 i 번째 층 j 번째 기둥의 소요축력, $(\phi_c P_n)_{ij}$ 는 기둥의 설계압축강도이다. 기둥의 경우는 휨과 압축을 동시에 받게 되므로, 압축력으로 인해 기둥이 받게되는 압축력과 추가된 휨모멘트를 함께 고려하여 보-기둥에 대한 압축-휨강도 조합에 대한 제약조건식을 정립하여야 하므로 LRFD C1-1 ~ C1-5의 규정에 의해 이를 정식화하면 식(16a)와 식(16b)와 같다.

$\left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) \geq 0.2$ 인 경우,

$$G_{ij}(4) = 1.0 - \left\{ \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \right) \right\}_{ij} \geq 0 \quad (16a)$$

$\left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) < 0.2$ 인 경우,

$$G_{ij}(4) = 1.0 - \left\{ \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \right) \right\}_{ij} \geq 0 \quad (16b)$$

(3) 기둥의 전단강도에 관한 제약조건식
 기둥의 전단강도 제약조건식은 LRFD F2-1~F2-3의 규정에 의해 식(17)과 같다.

$$G_{ij}(7) = (\phi_v V_n)_{ij} - (V_d)_{ij} > 0 \quad (17)$$

여기서, ϕ_v 는 0.90, $(V_d)_{ij}$ 는 i 번째 층 j 번째 보의 단면의 설계전단력, 그리고 $(\phi_v V_n)_{ij}$ 는 설계전단강도이다.

(4) 압축 기둥의 세장비 제약조건식
 압축기둥의 세장비는 LRFD E1의 규정에 의해 제약조건식인 식(18)와 같이 제약화 된다.

$$G_{ij}(8) = 200 - \left(\frac{KL}{r_y} \right)_{ij} \geq 0 \quad (18)$$

4. 최적설계의 적용 및 결과

본 연구에서 전개한 2차 탄성해석과 매개변수를 이용한 반강접 효과를 고려하여 구조해석을 수행하고 다단계 동적계획법에 의한 최적화 알고리즘을 이용하여 최적설계하였다. 적용된 반강접 접합부는 양면복부앵글 접합부, 상·하 플랜지 접합부 및 양면복부앵글을 가진 상·하 플랜지 접합부를 사용하였다. 또한 강접

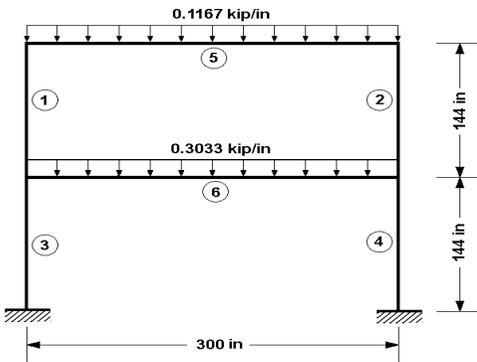


Fig. 6 2층 1경간 강뼈대구조물

합 및 반강접 접합에서 부재의 곡률수축효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각에 대하여 최적설계를 수행하였다.

4.1 2층 1경간 강뼈대 구조물

양단지점부가 고정된 2층 1경간의 뼈대 구조물에 대하여 최적설계를 수행하였다. 설계에 대한 구조물의 형상은 Fig. 6과 같다. 접합부는 강점으로 설정되었으며, 모든 부재는 횡좌굴이 방지되었다고 가정하였다. 부재의 최적화 모델은 시공과정의 역순으로 윗층의 보부터 아래층으로 모델링되었다. 2층 1경간 뼈대구조물에서 1차 탄성해석의 경우, 유효길이계수는 Dumonteil⁽⁸⁾의 식에 의해 구한 값과 1로 정한 경우에 대하여 최적화에 적용하였으며, 2차 탄성해석의 경우, Bowing Effect를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각에 대하여 최적화를 수행하였다.

1차 탄성해석과 2차 탄성해석에 의해 해석된 뼈대 구조물의 최적화를 수행한 결과, 목적함수의 수렴과정은 Fig. 7과 같다. 1차 탄성해석의 K의 식을 사용한 경우와 1로 둔 경우에 목적함수 값은 각각 2.015 kips, 2.014 kips로 나타났다. 단단계 동적최적화기법에 따라 K의 식을 이용할 경우, 하층 기둥은 전단계에서의 I_x 를 이용하여 절점의 G값을 계산후 식에 대입하여 구하도록 모델링하였다.

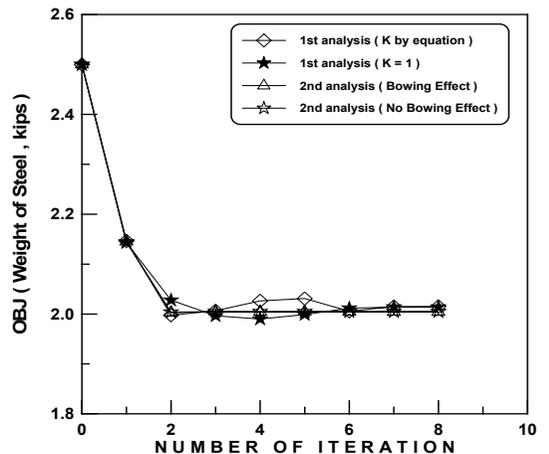


Fig. 7 1차 탄성해석과 2차 탄성해석의 목적함수 수렴과정

2차 탄성해석에서 Bowing Effect를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 목적함수 값은 각각 2,004 kips, 2,005 kips로 나타났다. 2층 1경간 뼈대구조물은 K의 식을 사용한 경우와 K를 1로 둔 경우의 최적결과가 큰 차이가 없지만 이는 전체 부재가 많지 않고 부정정차수가 적은 경우로 인해 기인한 것으로 보인다. 기둥의 경우는 각 경우에 약간의 차이를 가지고 있으나, 이는 K값에 따라 변하는 축력의 영향을 받기 보다는 보-기둥의 강도 제약 조건식의 모멘트의 영향을 받는 것으로 나타났다. 1차 탄성해석의 결과가 2차 탄성해석보다 약간 크게 나타났다. 상부기둥의 경우, 1차 탄성해석이 2차 탄성해석보다 단면이 작고, 하부기둥의 경우는 1차 탄성해석이 2차 탄성해석보다 큰 단면을 형성하였다.

4.2 2층 3경간 강뼈대 구조물

2층 3경간 뼈대 구조물의 형상은 Fig. 8⁽⁶⁾에 나타내었다. 강접합(FR) 및 반강접접합부(PR)를 고려하여 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용하여 수립된 목적함수는 Fig. 9와 같다.

반강접 접합부는 양면 복부앵글을 가진 상·하 플랜지 접합부에 적용된 매개변수 중, 수정된 지수모델을 선택하였으며 접합부의 최적설계는 수행되지 않았다. 비선형 보-기둥 이론에 의하여 Bowing Effect를 고려한 경우와 선형화된 보-기둥 이론에 의해 Bowing Effect가 무시된 경우 각각에 대하여 최적설계가 되었

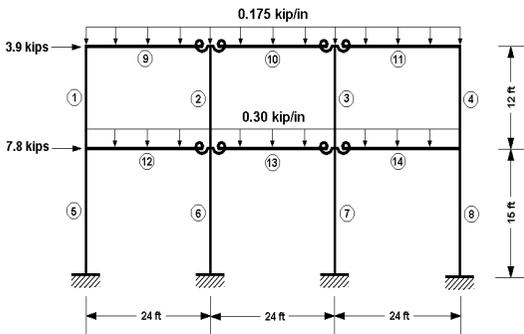


Fig. 8 2층 3경간 강뼈대 구조물

다. 하중은 사하중과 활하중을 연직하중으로, 횡하중을 고려하였다.

Fig. 9는 강접 및 Bowing Effect를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 반강접 접합부가 적용된 경우에 대하여 최적과정을 보여주고 있다. 반강접의 경우는 유효길이계수(K)에 대한 Dumonteil의 식과 1로 둔 경우 각각에 대한 최적결과의 비교를하였다. Fig. 9는 반강접경우의 목적함수가 강접의 경우보다 12%정도 크게 수렴하였다. 이는 접합부의 반강접성이 부재의 외력에 대한 저항강성을 저하시켜 부재의 모멘트의 향상을 발생시킴으로서 최적설계시 큰 단면을 선택되었다고 판단된다.

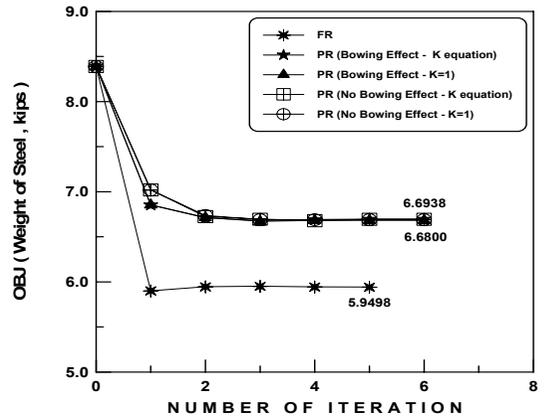


Fig. 9 강접합 및 반강접 접합부가 적용된 경우 최적화 수렴과정

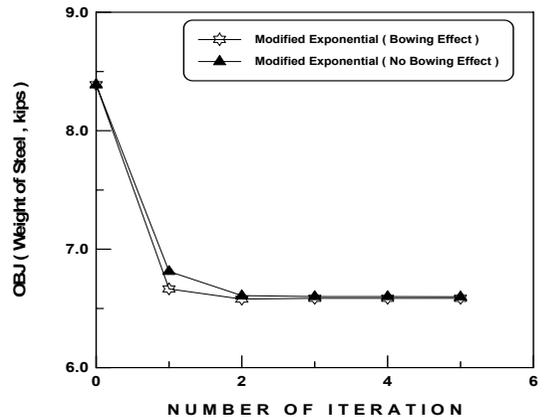


Fig. 10 BWTB 수정된 지수모델의 최적종량

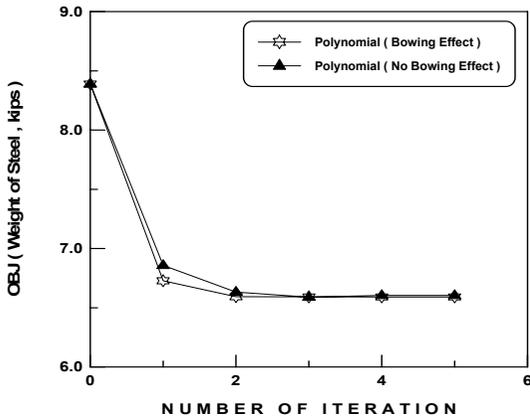


Fig. 11 BWTB 다항식 모델의 최적중량

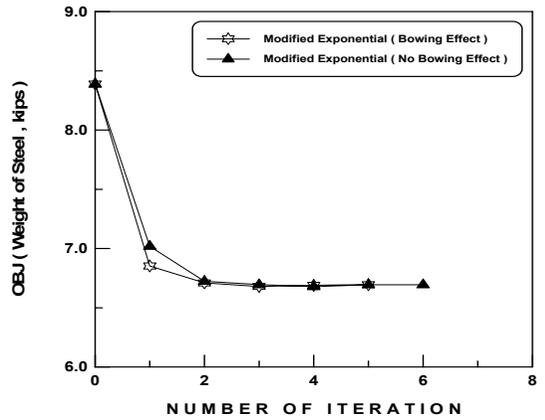


Fig. 13 BW 수정된 지수모델의 최적중량

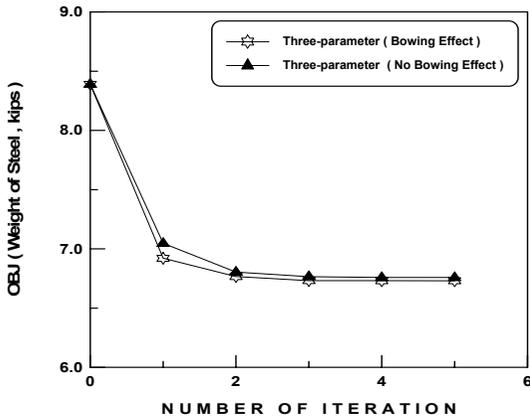


Fig. 12 BWTB 역급수 모델의 최적중량

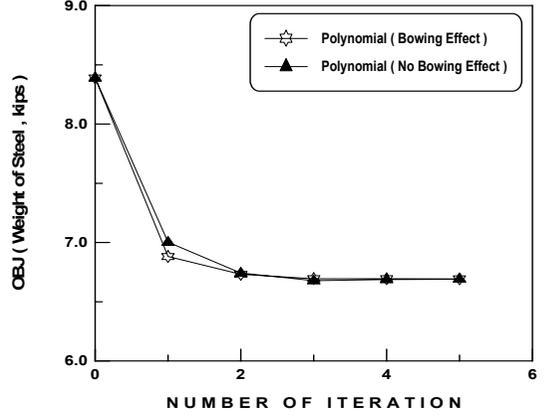


Fig. 14 BW 다항식 모델의 최적중량

양면 복부앵글을 가진 상·하 플랜지 접합부(BWTB)에 대해 수정된 지수모델, 다항식 모델 및 역급수 모델 각각에 대한 2층 3경간 구조물의 최적중량은 Fig. 10~12와 같다. 각 모델에서 Bowing Effect를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 최적설계에 적용하였다. 양면 복부앵글(BW)을 가진 접합부에 대해 수정된 지수모델, 다항식 모델, 역급수 모델의 매개변수를 이용하여 최적화한 결과는 Fig. 13~15와 같다.

Bowing Effect를 고려한 경우와 고려하지 않은 상·하 플랜지 접합부에 대한 각 모델별로 각각 최적화를 수행하였다.

2차 탄성해석에서 Bowing Effect가 고려된 경우와

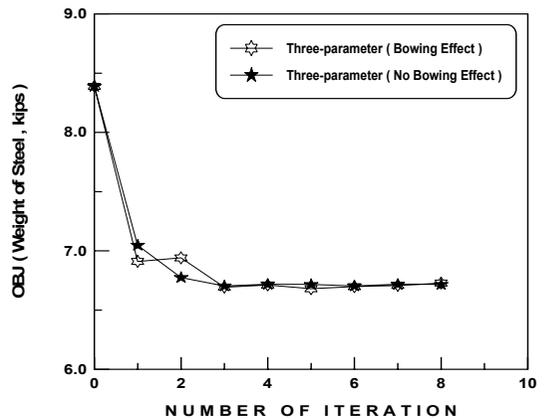


Fig. 15 BW 역급수 모델의 최적중량

고려되지 않은 경우 각각에 대한 목적함수의 수렴값이 6.694kips, 6.693kips로 미미한 차이를 보였다. 이는 각 경우의 단면력의 차이가 최적결과에 영향을 줄 만큼 크지 않기 때문이다. 또한 K의 식을 사용한 경우와 1로 둔경우에 목적함수값이 크게 차이를 보이지 않는 것은 최적의 단면의 설정에 K값에 따라 변하는 축력의 영향을 받기보다는 휨모멘트의 변화에 단면이 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 반강접 접합부별 수정된 지수모델, 다항식 모델, 멱급수 모델의 세가지 모델의 매개변수를 도입하여 최적설계를 수행한 결과 세가지 모델별 목적함수의 수렴은 양호한 것으로 나타났다. Bowing Effect가 고려된 경우 및 고려되지 않은 경우 큰 차이가 나타나지 않았으나 유연성을 가지는 정도에 따라 Bowing Effect의 영향을 가지는 것으로 나타났다. 양면 복부앵글을 가진 상·하 플랜지 접합부와 상·하 플랜지 접합부의 경우의 목적함수는 0.2~0.5%정도의 차이를 보이고 있으나 유연성이 가장 큰 양면 복부앵글을 가진 접합부의 경우의 목적함수는 0.5~1.2%정도의 차이를 나타냈다. 목적함수의 값은 접합부의 강성이 클수록 작은 값을 나타내었고, 강성이 가장 작은 양면 복부앵글을 가진 접합부가 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 접합부의 강성이 작을수록 횡력에 대한 저항이 작아져서 횡변위에 대한 제약조건이 더욱 주계약으로 된 것으로 사료된다. 양면 복부앵글을 가진 접합부는 상대적으로 강성이 큰 다항식 모델의 최적결과가 작게 나타났으며, 수정된 지수모델과 멱급수 모델은 거의 같은 결과를 보였다. 상·하 플랜지 접합부는 수정된 지수모델과 다항식모델의 강성이 크므로 최적결과가 작은 값이 선택되었고, 멱급수 모델의 강성이 가장 작으므로 최적결과가 조금 크게 나타났다. 반강접을 고려하는 세 모델 중 멱급수 모델이 최적결과가 조금 크게 나왔으나 비교적 용이하게 적용할 수 있는 멱급수 모델은 실무에도 적용성이 크다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서 개발된 반강접 접합부를 고려한 2차 탄성해석에 의한 강뺨대 구조물의 최적설계 프로그램을

을 이용하여 적용된 예들을 중심으로 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기하학적 비선형을 고려한 2차 탄성해석법을 이용하여 강접 및 다양한 모델을 가진 반강접 강뺨대 구조물의 최적설계 프로그램을 개발하였다.
- 2) 2차 탄성해석에 의한 하중증분법과 할선강성법을 강뺨대 구조물의 해석에 적용함으로써 보다 정밀한 구조해석이 가능하였으며 구조물의 정확한 거동을 파악할 수 있었다. Bowing Effect를 고려함으로써 보다 정확한 해석은 가능하였으나 최적설계에 미치는 영향은 1.2%미만으로 미미하였다.
- 3) 강접 및 반강접 접합부를 가진 강뺨대 구조물의 최적설계결과를 살펴보면 반강접접합부의 목적함수값이 약 12%정도 크게 나타났다. 비록 반강접연결부의 경비가 다소 많이 나오나 전체 시공상의 편리성과 공기단축으로 인한 경제성을 고려한다면 반강접연결부의 장점이 충분히 있다고 사료되며 이에 추가연구가 필요하다고 사료된다.
- 4) 강뺨대 구조물의 접합부상태를 판단하는 기준은 실험의 결과로부터 얻어지는 접합부상태의 매개변수들이다. 보다 정확한 해석과 최적설계결과를 얻기 위해서는 다양한 접합부에 대한 실험결과가 데이터베이스화되어야 하고 구조물의 거동과 형상에 적절한 접합부가 선택될 수 있어야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조창근 외 3인, 최적내진설계에 의한 강뺨대구조물의 브레이싱의 효과, 대한토목학회논문집 18권, I-6호, p.829-840, 1998.
2. Deierlein, G. G. Hsieh S.-H. and Shen, Y.-J. (1990). "Computer-Aided Design of Steel Structures with Flexible Connections", Proc. of 1990 National Steel Construction Conference, AISC, Kansas City, Missouri.
3. Toader, I.H.I. (1993) "Stability functions for members with semi-rigid joint connections." Journal of Structural Engineering, ASCE, 119(2), pp. 505-521.
4. Yau, C.Y., and Chan, S.L. (1994) "Inelastic and stability analysis of flexibly connected steel frames by springs-in-series model."

-
- Journal of Structural Engineering, ASCE, 120(10), pp.2803-2819
5. AISC LRFD (1994). Load and Resistance Factor Design Specifications for Structural Steel Buildings, 2nd Ed., Chicago : American Institute of Steel Construction.
 6. Goto, Y., and Chen, W. F. (1987a). "Second order Elastic Analysis for Frame Design," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. ST7, pp. 1501-1519.
 7. Kishi, N., and Chen, W. F. (1986a). Steel Connection Data Bank Program, CE-STR-86-18, West Lafayette, IN : School of Civil Engineering, Purdue University. See also Proceedings of the Sessions at Structures Congress Related to Materials and Member Behavior, Orlando, FL, August 17-20, New York : ASCE, 1987, pp. 89-106.
 8. Dumonteil. P. (1992). Simple Equations for Effective Length Factors. Engineering Journal. ASCE, Vol. 29, No3, pp 111-115
 9. Sommer, W.H., (1969) "Behavior of Welded Header Plate Connections", M.S. Thesis, University of Toronto, Ontario, Canada
 10. Kishi, N., and Chen, W. F. (1990). " Moment-Rotation Relations of Semi- Rigid Connections with Angles," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. ST7, pp. 1813-1834.
 11. Goto, Y., S. Suzuki, and Chen, W. F. (1991b). "Bowing Effect on Elastic Stability of Frames under Primary Bending Moments," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. ST1, pp. 111-127.

(접수일자 : 2004년 1월 20일)