

# AISC2005에 기준한 변단면 선설계 건축물시스템의 자동화 최적구조설계

## Self-Optimizing Structural Design of a Pre-engineered Building System with Nonprismatic Members based on AISC2005

김 용 석<sup>1)</sup> · 오 명 호<sup>2)</sup> · 송 병 규<sup>3)</sup>  
*Kim, Yong Seok · Oh, Myoung Ho · Song, Byung Kyu*

요약 : 철골 Pre-Engineered Building System(PEBS)이 국내에서도 80년도 후반부터 상당히 일반화되었지만 변단면 PEBS는 대부분 국외에서 개발된 최적화 프로그램으로 구조설계가 수행되고 있다. 이 연구에서는 3차원 변단면 PEBS의 구조설계를 AISC2005의 허용응력설계법과 KBC 기준에 따라 주어진 여러 제약조건들을 만족하도록 수치해석법으로 최적화하는 프로그램을 개발하였다. 변단면 구조물의 최적화 설계는 구조해석과 최적 부재설계를 수행하는데, 구조물의 최소 중량화를 위해서 구조해석과 부재설계 과정을 허용응력조건과 변위조건이 만족될 때까지 반복 수행한다. 2, 3차원 변단면 구조물을 최적화 설계한 결과에 의하면 변단면 용접 H-형강으로 설계하는 것이 압연 H-형강보다 상당한 철골 절약효과가 있는 것으로 나타났다. 변단면 용접 H-형강으로 설계하는 경우 구조물의 종류에 따라 차이는 있지만 AISC2005 기준으로 설계하는 것이 AISC1989 기준보다 철골량이 줄어들었고, 부재 춤도 작게 설계되어 웹 좌굴에 새 기준이 더 안전한 것으로 평가되었다.

ABSTRACT : Structural design of most nonprismatic Pre-Engineered Building Systems (PEBS) is performed using optimizing software developed in foreign countries. In this study, a structural optimizing software for the design of 3-D structures of nonprismatic PEBS is developed according to the allowable stress design method of AISC2005 and KBC. Optimizing structural design with nonprismatic members is carried out by repeating the process of structural analysis and member design to minimize the weight of a structure. According to the optimizing design results of 2-D and 3-D structures with nonprismatic members, there are considerable steel savings in designing structures with nonprismatic H-shaped built-up sections rather than with H-shaped rolled sections. When H-shaped built-up sections were used, the weight of the structural steel was reduced when AISC2005 specification rather than AISC1898 was used in the design. It is therefore concluded that utilizing the new AISC2005 specification is safer in preventing web buckling because the height of a member is designed to be small despite some differences depending on the structural type.

핵심용어 : 선설계 건축물시스템, 최적화 프로그램, 허용응력설계, 변단면 부재, AISC2005 시방서

KEYWORDS : PEBS, optimizing software, allowable stress design, nonprismatic member, AISC2005 specification

### 1. 서론

우리나라의 산업화가 본격화되던 70년대부터 철골구조에 대한 필요성이 커지고 국내 철강 생산량이 증가하면서 철골구조에 대한 연구와 사용도 급격히 활성화되었다. 초창기 철골구조에 대한 선호도가 높았던 것은 철골구조의 공간성과 시공성이 우수하기 때문이었으나, 고가인 철골의 가격 경쟁력이

낮은 것이 철골구조 보급에 큰 장애 요인이었다.

초기 철골구조설계는 주로 공장에서 압연된 형강을 사용하였기 때문에 단위면적당 철골량이 상당히 높았으나, 80년도 초부터 유럽과 미국에서 도입되기 시작한 경량철골에 관한 설계법이 보급되면서 철골구조의 경쟁력은 커졌고 경량철골구조에 대한 연구가 상당히 탄력은 받았지만 실무적인 차원에서 수요가 상당히 제한적이어서 활성화는 상당히 느리게 진행되었다. 그러

1) 국립목포대학교 건축공학전공 교수, 공학박사, 건축구조기술사(yskim@mokpo.ac.kr)

2) 교신저자, 국립목포대학교 건축공학전공 조교수, 공학박사

(Tel: 061-450-2458, Fax: 061-450-6454, E-mail: ohmho@mokpo.ac.kr)

3) (주)민영엔지니어링건축사사무소, 공학석사, 건축구조기술사(my3431@kornet.net)

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

나 철골구조의 가격 경쟁력에 대한 요구가 더욱 커지면서 70년도 후반부터 유럽과 미국에서 물류창고형 경량철골구조를 중심으로 개발된 Pre-Engineered Building System(PEBS)이 80년도 후반에 국내에 보급되기 시작하여 현재는 실무현장에서 상당히 일반화되었다.(MBMA, 2002) 하지만 대부분의 PEBS는 단면이 일정한(prismatic) 경량형강이나 소형 형강을 이용한 것으로 변단면(nonprismatic) 용접H-형강을 사용한 경우는 전체적으로 아직도 상당히 한정적이다.

변단면 철골구조는 1974년 AISC 시방서에 처음 소개되면서 사용되었는데, AISC2005 (2005)에서는 균일단면이나 변단면을 모두 같은 기준에 따라 설계할 수 있도록 개정되었다. 국내에서는 변단면 철골구조에 대한 연구가 아직은 미진하여 독자적인 설계기준이 마련되지 못한 실정이라서 AISC 기준을 준용하고 있고, 변단면 철골구조 설계를 위한 범용프로그램도 대부분 외국에서 개발된 것을 사용하고 있어서 그 사용성에 상당한 제한을 받고 있다. 이러한 제약조건을 극복하기 위해 국내에서 개발된 최초의 변단면 H-형강 3차원 철골구조 최적-자동화 프로그램은 AISC1989를 기준으로 허용응력법에 따라 1994년에 개발되어 등록된 컴퓨터프로그램 DPBS/STRA이다.(김용석, 1995) 그 후 10여년 동안 국내에서 변단면 철골구조의 부재성능 실험이나 설계에 관한 연구 논문은 수 편이 발표되었지만 변단면 PEBS 최적설계 전산프로그램 개발에 관한 연구결과는 2차원 최적설계에 관한 논문 외에는 없는 것으로 조사되었다.(김치경, 1999; 김호수, 1996; 심현주, 2007; 이한주, 2007) 한편 변단면 PEBS 최적구조설계의 기준이 되었던 AISC 시방서가 2005년에 새롭게 개정되어 그 동안 개발되었던 모든 전산설계프로그램들을 새로운 기준에 따라 수정해야 할 상황이다.

이 연구에서는 위에서 설명한 여러 여건들을 고려하고 3차원 구조물의 구조설계를 주어진 여러 제약조건들을 만족하도록 최적화하고, 구조물의 부재설계를 AISC2005 시방서의 허용응력설계법과 KBC2009 기준에 따라 자동화하는 수치해석법을 개발하여 실무적 차원에서 변단면 선설계 건축물시스템에 대해 실용화한 전산프로그램을 이 연구에서 개발하였다.(Borkowski, 1990)

## 2. 부재최적화 자동설계

변단면 철골구조물의 최적화를 위한 자동설계는 그림1에 나타난 것처럼 최초로 철골구조물에 관련된 형상 및 경계조건, 재료특성, 하중조건 등 기본자료와 초기 가정부재를 입력하여 3차원 구조물에 대한 구조역학적 해석을 하는 구조해석 과정과 구조해석 결과로 가정한 부재를 검토하여 최적부재 여부를

판정하는 최적부재 설계 과정을 반복적으로 수행하여 수렴된 최적부재단면을 선정하는 것이다.

구조물의 해석과정에서는 변단면 부재의 강성행렬을 수치해석법에 의해 구성한 후 하중행렬에 따라 절점변위와 부재력을 계산하며, 최적부재 설계과정에서는 부재의 조합응력과 부재높이 제한, 판두께비, 부재의 경계조건 및 횡방향 지지조건 등을 고려한 부재허용 응력을 비교 검토하여 부재를 재가정한 후 부재그룹, 부재 양단에 접합된 부재의 높이, 구조물의 변위제한 등을 고려하여 부재를 또 다시 가정한다. 이 때 가정한 부재가 해석 시 사용된 부재와 일치하지 않으면 다시 가정한 부재로 최적화 설계를 반복한다.

이 최적부재 설계에서는 구조물의 보나 기둥 부재를 짧게 분할함으로써 구조물의 중량최적화를 증진시킬 수 있으며, 같은 형상을 가져야 하는 보나 기둥들은 같은 부재그룹으로 분류하여 최적화를 수행할 수 있고, 어떤 부재그룹의 부재의 플랜지를 통일할 수도 있다.

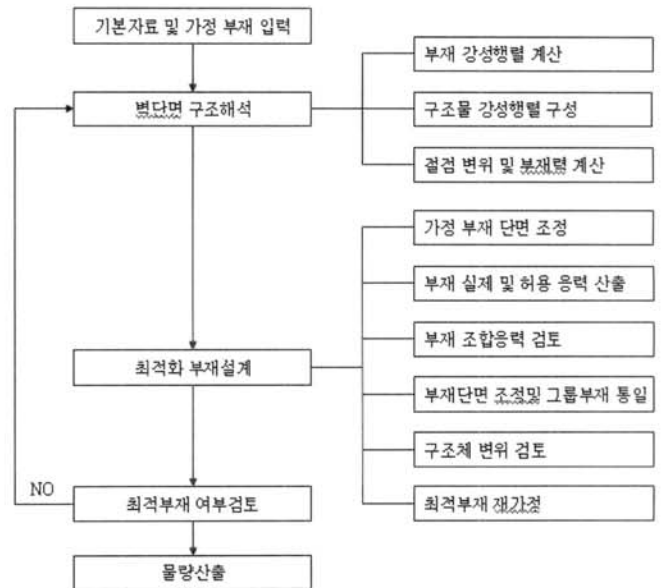


그림 1. 최적부재 자동설계 과정

## 3. 변단면 부재 강성 행렬

변단면 부재를 갖는 구조물의 구조해석을 위해서 각 부재의 강성행렬을 구해야 하는데, 부재가 균일한 단면인 경우에는 이론식에 의해 구할 수 있으나 부재가 변단면일 경우에는 다음에 주어진 3차원 변단면 부재 강성행렬을 이용하여 구해야 하는데, 요소에 포함된 변단면 적분항은 수학적 공식으로 구할 수 있다.(Friedman, 1992) 부재강성행렬이 구성되면 변환을 통하여 전체 구조물의 강성행렬을 구성하고 외력을 작용

하여 구조물의 변위를 구한다. (Livesley, 1975)

$$K^1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & b_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 & 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & b_4 \\ & & c_1 & 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & c_4 & 0 \\ & & & d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_1 & 0 & 0 \\ & & & & c_3 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & b_3 & 0 & -b_2 & 0 & 0 & 0 & b_5 \\ \hline & & & & & & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & b_1 & 0 & 0 & 0 & -b_4 \\ & & & & & & & & c_1 & 0 & -c_4 & 0 \\ & & & & & & & & & d_1 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & c_6 & 0 \\ & & & & & & & & & & & b_5 \end{bmatrix}$$

여기서  $a_1 = \frac{EA_0}{L} \frac{3\beta/(1+3\beta)a}{\ln(1+3\beta/(1+3\beta)a)}$

$a = H_L/H_0 - 1 \quad \beta = A_w/6A_f$

$b_1 = b_{11}/D_1 \quad b_2 = b_{12}/D_1$

$b_3 = (b_{12}L - b_{22})/D_1 \quad b_4 = b_{21}/D_1$

$b_5 = b_{22}/D_1 \quad b_6 = (b_{21}L - b_{22})/D_1$

$b_{11} = \int_0^L 1/EI_z(x) dx$

$b_{12} = \int_0^L x/EI_z(x) dx$

$b_{21} = b_{11}L - b_{12}$

$b_{22} = b_{12}L - \int_0^L x^2/EI_z(x) dx$

$D_1 = -b_{11}b_{22} + b_{12}b_{21}$

$I_z(x) = EI_z \left[ 1 + \frac{3\beta}{1+\beta} \frac{x}{L} (a-1) + \frac{3\beta}{1+\beta} \frac{x}{L} (a-1)^2 \right] \frac{L}{G.A.z} \frac{\ln(1+a)}{a}$

$c_1 = c_{11}/D_2 \quad c_2 = c_{12}/D_2$

$c_3 = (c_{12}L - c_{22}) / D_2 \quad c_4 = c_{21}/D_2$

$c_5 = c_{22}/D_2 \quad c_6 = (c_{21}L - c_{22})/D_2$

$c_{11} = \int_0^L 1/EI_y(x) dx$

$c_{12} = \int_0^L x/EI_y(x) dx$

$c_{21} = c_{11}L - c_{12}$

$c_{22} = c_{12}L - \int_0^L x^2/EI_y(x) dx$

$D_2 = -c_{11}c_{22} + c_{12}c_{21}$

$I_y(x) = EI_y \left[ 1 + \frac{2+3\beta}{1+\beta} \frac{x}{L} (a-1) + \frac{3\beta}{1+\beta} \frac{x}{L} (a-1)^2 \right] \frac{L}{G.A.z} \frac{\ln(1+a)}{a}$

$d_1 = 1 / \left[ \frac{3L}{G H_0 t_w^3 a} \ln(1 + \frac{H_0 t_w^3}{3J_0} a) \right]$

#### 4. 최적화 부재설계 알고리즘

##### 4.1 초기부재 가정

부재 최적화를 위한 초기 단계에 가정부재의 단면특성 입력이 필요한데 최초 부재단면은 하중상태를 고려하여 개략적으로 가정하고, 이 후에는 출력된 부재력에 따라 부재의 각 점에서 단면의 춤을 모멘트에 따라 최적화를 촉진하기 위해서 다음과 같이 가정하였다. (Salmon, 1996)

H-형강 부재의 단면2차모멘트  $Z \approx A_f h + \frac{t_w h^2}{6}$  이므로, 플랜지 단면적  $A_f = \frac{Z}{h} - \frac{t_w h}{6}$  이다. (1)

또, 웨브 단면적  $A_w \approx t_w h$  이므로, 부재의 단면적은 다음과 같다.

$$A = 2A_f + A_w = 2 \frac{Z}{h} + \frac{2}{3} t_w h \quad (2)$$

그런데, AISC2005기준에 의한 비충실(Noncompact) 웨브의 판폭두께비는

$$t_w \geq \frac{1}{5.7} \sqrt{\frac{F_y}{E}} h \quad \text{이므로} \quad (3)$$

$$A \geq 2 \frac{Z}{h} + \frac{1}{8.55} \sqrt{\frac{F_y}{E}} h^2 \quad \text{이 된다.}$$

따라서 최소 단면적을 갖는 최적부재의 단면 춤은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$h \approx 2.046 \sqrt[6]{\frac{E}{F_y}} \sqrt[3]{Z}$$

그러나 초기 모멘트에 따른 개략적인 단면의 춤은 위 식에  $Z = \frac{M}{\left(\frac{F_y}{\Omega}\right)}$  를 대입하여 다음 식으로 가정할 수 있다.

$$h \approx 2.046 \sqrt[6]{\frac{E \Omega^2}{F_y^3}} \sqrt[3]{M} \quad (4)$$

또, 단면의 춤  $h$ 가 가정되면 부재의 웨브두께  $t_w$  는 식(2)로 가정할 수 있다.

그런데, 웨브의 최소두께를  $t_{w_{min}}$  로 가정하면 식(3)에서

$$h \leq 5.7 t_{w_{min}} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{이 된다.}$$

다음에는 단면의 폭과 플랜지 두께를 가정해야 하는데, 개

략적인 플랜지의 단면적  $A_f = \frac{M}{h(\frac{F_y}{\Omega})}$  이고,

$$\text{단면폭 } B = \frac{A_f}{t_f} = \frac{M}{ht_f(\frac{F_y}{\Omega})} = \frac{\sqrt[3]{\Omega^2 M^2}}{2.046t_f \sqrt[6]{EF^3}} \text{ 이 된다.}$$

그런데 AISC2005기준에서 플랜지의 폭두께비에 의하면  $\frac{B}{2t_f} \leq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \lambda_p \text{ (for compact section)}$  (5)

이므로 플랜지두께  $t_f$ 는 다음 식으로 가정할 수 있고, 단면 폭도 앞에 주어진 식으로 가정할 수 있다.

$$t_f \geq \sqrt{\frac{\Omega M}{0.76h \sqrt{EF_y}}} = 0.802 \sqrt[3]{\frac{\Omega M}{E}} \text{ (6)}$$

그런데, 웨브의 최소두께( $t_{w_{min}}$ )가 가정된 경우에는 플랜지의 최소두께  $t_f \approx 0.48 \sqrt{\frac{\Omega M}{t_{w_{min}} E}}$  이 된다.

그러나 실무적 차원에서 설계를 고려하여 이 프로그램에서는 부재의 최소 판두께는 0.26cm로, 플랜지의 최소 폭은 10cm로, 웨브의 최소 높이는 20cm로 최소 부재단면 조건을 제한하였으며, 플랜지 두께는 두께가 6mm이하인 경우에는 0.5mm씩 6mm이상인 경우에는 1mm씩 증가되도록 가정하고, 플랜지 폭은 2.5cm씩 웨브 높이는 부재단에서 5cm씩 증가하도록 부재단면을 가정하였다.

#### 4.2 변단면 부재 기울기와 단면폭 조정

위에서 가장한 변단면 부재의 단면은 시작점, 중간점 및 끝점에서 단면의 춤이 다를 수 있기 때문에 부재의 기울기를 시작점과 끝점을 기준으로 직선적으로 변화도록 부재 중간점에서 단면의 춤을 증가시켰으나 부재 중간점에서 단면의 춤이 기울기를 벗어날 경우에는 중간점에서 단면의 춤을 기준으로 단면의 춤이 일정하도록 시작점과 끝점에서 단면의 춤을 증가시켰다.

부재 단면폭도 각 변단면 부재의 시작점, 중간점 및 끝점에서 다를 수 있기 때문에 각 점에서의 단면폭 중 최대값을 단면폭으로 조정하였으며, 균일단면 부재의 경우 단면폭이 단면의 춤보다 클 때에는 단면폭을 단면의 춤과 같게 조정하였다.

#### 4.3 변단면 부재그룹 부재 기울기와 단면폭 조정

변단면 부재그룹 부재기울기는 소 부재그룹의 각 요소 부재들 중간점에서 부재그룹의 단면춤 평균값을 계산한 후 요소 부재들의 중간점에서 평균 단면춤에 최적하도록 Least Squares Fitting 수치해석법으로 기울기를 결정하였다. 이 변단면 부재그룹 부재기울기는 부재그룹의 양단부재와 양단부재에 연결되는 부재의 단면춤을 평균하여 다시 조정되며, 부재그룹 내 모든 요소 부재들의 각 점에서 단면춤과 부재기울기도 재조정된다.

또 변단면 부재그룹의 단면폭도 부재그룹 내 모든 부재의 단면폭 평균값으로 조정된다.

#### 4.4 부재 단면 웨브 및 플랜지 두께 재조정

앞에서 조정된 변단면 부재의 단면 폭과 단면 춤에 따라 각 부재의 시작점, 중간점 및 끝점에서 웨브 두께와 플랜지 두께를 식(3)과 식(5)를 이용하여 다시 계산하고 세 점에서 계산된 두께 중 최대값을 부재의 웨브 두께와 플랜지 두께로 재조정한다.

#### 4.5 구조물 변위 검토

구조물의 변위 검토는 지정한 중요 절점에서 수평이나 수직의 상대적 변위를 계산하여 입력한 설계허용조건과 비교 검토하고, 기준점에 대한 구조물의 실제적인 상대변위가 설계허용범위(일반적으로 수평변위의 경우 높이(H)/200, 수직처짐의 경우 길이(L)/300)를 초과할 경우에는 지정된 관련 부재들의 단면강성을 증가시켜서 변위를 조절한다.

#### 4.6 부재단면 허용응력 산출

각 부재단면의 응력검토를 위해 설계응력을 설계방법과 설계기준에 따라 다음과 같이 계산하였다.

웨브가 충실(compact), 비충실(noncompact)하거나 세장(slender)된 일축이상에 대칭인 용접 H-형강 부재의 허용응력을 다음과 같이 계산하였다.(AISC, 2005)

##### 4.6.1 허용인장응력

허용인장응력( $F_t$ )은 항복응력을 안전율로 나누는 다음 식으로 구한다.

$$F_t = \frac{F_y}{\Omega}$$

4.6.2 허용압축응력

허용압축응력 ( $F_a$ )은 휨좌굴과 뒤틀림좌굴을 고려해야 하지만 Salmon(1996)에 의하면 뒤틀림좌굴은 무시할 수 있기 때문에 이 연구에서는 휨좌굴만을 고려하여 다음 식으로 구한다.

$$F_a = \frac{F_{cr}}{\Omega_c}$$

여기서,  $F_{cr}$ 은 다음 식으로 구한다.

$$(1) \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q \cdot F_y}}$$

$$F_{cr} = [0.658 \left(\frac{Q \cdot F_y}{F_e}\right)] (Q \cdot F_y) = 0.658 \left(\frac{F_y}{F_e}\right) F_y \leq F_y$$

$$(2) \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{Q \cdot F_y}}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \leq F_y$$

여기서,  $Q = 1$  (H-형강의 경우)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

$$\frac{KL}{r} = \begin{cases} \frac{K_y L_y}{r_y} & (\leq 200) \\ \frac{K_z L_z}{r_z} & \end{cases}$$

로 부재의 작은 단부에서 양방향 세장비 중 큰 값

4.6.3 허용휨응력

(1) 강축방향이 힘을 받을 때

$$\text{웨브의 세장비를 } \lambda_w = \frac{h_c}{t_w} \approx \frac{h}{t_w}$$

$$\text{충실웨브의 한계세장비를 } \lambda_{pw} \approx 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\text{비충실웨브의 한계세장비를 } \lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ 이라 하면,}$$

①  $\lambda_w < \lambda_{pw}$  인 경우

$$F_{bz} = \frac{1}{\Omega} \frac{Z_x}{S_{xc}} F_y \leq \frac{F_y}{\Omega}$$

②  $\lambda_{pw} \leq \lambda_w \leq \lambda_{rw}$  인 경우

다음 압축플랜지 항복, 인장플랜지 항복, 횡방향 뒤틀림 좌

굴에 의해 결정되는 허용압축응력 중에서 작은 값에 따라 결정된다.

- 압축플랜지 항복의 경우 :

$$F_{bz_c} = \frac{R_{pc}}{\Omega} F_y$$

- 인장플랜지 항복의 경우 :

$$F_{bz_t} = \frac{R_{pt}}{\Omega} \left(\frac{S_{xt}}{S_{xc}}\right) F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 1.0$$

$$\text{or } F_{bz_t} = \frac{R_{pt}}{\Omega} \left(\frac{Z_x}{S_{xc}}\right) F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 1.0$$

- 횡방향 뒤틀림좌굴의 경우 :

$$L_b \leq L_p : F_{bz_f} = \frac{1}{\Omega} \frac{Z_x}{S_{xc}} F_y$$

$$L_p < L_b \leq L_{r1} :$$

$$F_{bz_f} = C_b [R_{pc} - (R_{pc} - \frac{F_L}{F_y} (\frac{L_b - L_p}{L_{r1} - L_p}))] \frac{F_y}{\Omega} \leq \frac{R_{pc}}{\Omega} F_y$$

$$L_{r1} < L_b :$$

$$F_{bz_f} = C_b \frac{1}{\Omega} \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 Jshl \left(\frac{L_b}{r_t}\right)^2} \leq \frac{R_{pc}}{\Omega} F_y$$

그러나,  $F_{bz} \leq \frac{F_y}{\Omega}$  이어야 한다.

여기서

$C_b = 1.0$  으로 안전한 결과를 위해 가정

$$L_p = 1.1 r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$L_{r1} = 1.95 r_t \frac{E}{F_L} \sqrt{Jsh} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{F_L}{E} \frac{1}{Jsh^2}\right)}}$$

$$F_L = \frac{S_{xt}}{S_{xc}} F_y \geq 0.5 F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 0.7$$

$$F_L = 0.7 F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.7$$

$$Jshl = Jsh = \frac{J}{S_{xc} h_0}, \quad Jshl = 0 \quad \text{if } \frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0.23$$

$$R_{pc} = \frac{Z_x}{S_{xc}} - \left(\frac{Z_x}{S_{xc}} - 1\right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}}\right) \leq \frac{Z_x}{S_{xc}} \leq 1.6$$

$$R_{pt} = \frac{Z_x}{S_{xt}} - \left(\frac{Z_x}{S_{xt}} - 1\right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}}\right) \leq \frac{Z_x}{S_{xt}} \leq 1.6 \frac{S_{yc}}{S_{xt}}$$

③  $\lambda_{rw} \leq \lambda_w$  인 경우

다음 압축플랜지 항복, 인장플랜지 항복, 횡방향 뒤틀림 좌굴에 의해 결정되는 허용압축응력 중에서 작은 값에 따라 결정된다.

- 압축플랜지 항복의 경우 :

$$F_{bz_c} = \frac{R_{pg}}{\Omega} F_y$$

- 인장플랜지 항복의 경우 :

$$F_{bz_t} = \frac{1}{\Omega} \left( \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \right) F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 1.0$$

$$\text{or } F_{bz_t} = \frac{1}{\Omega} \left( \frac{Z_x}{S_{xc}} \right) F_y \quad \text{if } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 1.0$$

- 횡방향 뒤틀림좌굴의 경우 :

$$L_b \leq L_p : F_{bz_f} = C_b \frac{R_{pg}}{\Omega} F_y$$

$$L_p < L_b \leq L_{r2} :$$

$$F_{bz_f} = C_b [1 - 0.3 \left( \frac{L_b - L_p}{L_{r2} - L_p} \right)] \frac{R_{pg}}{\Omega} F_y \leq \frac{R_{pg}}{\Omega} F_y$$

$$L_{r2} < L_b : F_{bz_f} = C_b \frac{R_{pg}}{\Omega} \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{r_t} \right)^2} \leq \frac{R_{pg}}{\Omega} F_y$$

그러나,  $F_{bz} \leq \frac{F_y}{\Omega}$  이어야 한다.

$$\text{여기서 } L_{r2} = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{0.7 F_y}}$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300 a_w} \left( \frac{h}{t_w} - \lambda_{rw} \right) \leq 1.0$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \leq 1.0$$

(2) 약축방향이 힘을 받을 때

$$F_{b_y} = \frac{1}{\Omega} \frac{Z_y}{S_y} F_y \leq \frac{1.6}{\Omega} F_y$$

4.6.4 허용전단응력

용접H-형강의 플랜지와 웨브의 전단응력은 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$F_{v_z} = F_{v_y} = \frac{0.6}{\Omega} C_v F_y$$

$$\text{여기서, } C_v = 1.0 \quad \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_v = \frac{1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}}{\left( \frac{h}{t_w} \right)} \quad \text{if } 1.1 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}}$$

$$C_v = \frac{1.51 k_v E}{\left( \frac{h}{t_w} \right)^2 F_y} \quad \text{if } 1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_y}} < \frac{h}{t_w}$$

위 식에서  $k_v$  값은 웨브와 플랜지 전단에 따라 다음과 같이 결정한다.

(1) 웨브 전단

$\frac{h}{t_w} < 260$  인 웨브를 보강하지 않는 H-형강에서는  $k_v=5$ 를 사용한다.

(2) 플랜지 전단

플랜지 전단에서는  $k_v=1.2$ 를 사용한다.

4.7 부재단면 응력 검토

부재단면의 조합응력 상태는 부재단면 축응력 상태에 따라 AISC2005 식(H1)인 아래 식으로 검토한다.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{8}{9} \left( \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \right) \leq 1.0 \quad \text{if } \frac{f_a}{F_a} \geq 0.2$$

$$\frac{f_a}{2F_a} + \left( \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \right) \leq 1.0 \quad \text{if } \frac{f_a}{F_a} < 0.2$$

또, 플랜지에서는 축응력과 전단응력에 의한 Von Mises 조합응력도 만족하도록 다음 식으로 검토한다.

$$f_b^2 + 3f_{vz}^2 \leq f_t^2$$

한편, 웨브의 전단응력은 다음 식으로 검토한다.

$$f_{vy} \leq F_{vy}$$

4.8 최적부재 재가정

최적부재의 재가정은 앞에서 수행한 변위검토 결과와 부재단면 조합응력검토 결과를 종합해서 실시한다. 이 과정은 부재의 최적화를 위해 반복계산 과정인 재구조해석에 필요한 부재의 단면을 가정하는 단계이므로 구조해석에 가장 영향을 크게 미치는 단면2차모멘트가 근사한 부재가 되도록 단면의 두께만을 조정하여 부재를 재가정한다. 단면의 두께 가정 시 사

용한 수치해석법은 비선형 해석결과가 안정적으로 수렴하고 수렴속도가 빠른 할선1(Secant 1) 비선형 수치해석법을 이용하였다.

#### 4.9 재가정부재에 의한 재구조해석

최적화 구조설계 과정에서 전 단계 구조해석에서 사용한 부재가 부재설계에서 재선정한 부재와 일치하지 않을 경우에는 재구조해석과 최적설계를 반복 실시하여 구조해석에 사용한 부재와 부재설계에서 최종 선정된 부재가 일치할 때까지 부재의 재가정과 재구조해석을 반복 실시한다.

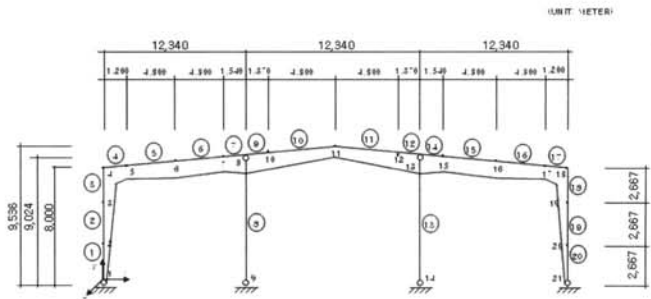


그림 3. 2차원 구조물 해석 모델

표 1. 3차원 구조물 최적화설계 결과 비교

설계기준	최적부재 번호	단면(mm)	골조 무게		무게 비교				
			kN	N/m <sup>2</sup>					
AISC 1989	BH형강 1,2,3,4	200x100x2.5x 8x 8	17.6	489	1.35				
	5,6,7,8,9,10,11	600x150x4.0x13x13							
	변단면 1,2,3,4	(200-250)x125x2.5x10x10							
	5,7	350x125x2.5x10x10							
AISC 2005	BH형강 8,9,10,11	(200-600)x125x3.5x 7x 7	13.7	381	1.05				
	6	600x150x4.0x13x13							
	압면 1,2,3,4	H-248x124x5.0x 8							
	H-형강 5,6,7,8,9,10,11	H-298x149x5.5x 8							
	변단면 BH형강	1,2,3,4				(250-350)x100x2.6x 8x 8	10.3	286	0.80
		5,7				350x100x2.6x 8x 7			
8,9,10,11		400x125x3.0x 9x 9							
6		H-298x149x5.5x 8							

(주) : BH-H x B x t<sub>w</sub> x t<sub>f</sub> (top) x t<sub>f</sub> (bott.)

#### 5. 최적화 구조설계 결과 비교

이 연구에서 AISC2005 기준에 따라 수정 개발한 프로그램을 이용하여 그림 2와 그림 3에 나타난 3차원과 2차원 철골구조물에 대한 최적화설계를 허용응력설계법(재료안전율 Ω 1.67)으로 수행하였다. 구조물의 부재설계는 AISC1989와 AISC2005 기준에 따라 H-형강과 조립 H-형강(BH-형강)으로 수행하였다. 구조부재의 특성은 모두 동일하게 가정하여 탄성계수는 21GPa을 강재의 항복강도는 330MPa을 사용하였다.

그림 2에 나타난 3차원 철골구조물에 작용한 하중은 지붕 바닥에 고정하중과 적재하중이 각각 2kN/m<sup>2</sup>씩 작용하는 것으로 하여 보에 등분포하중으로 작용시켰고, 외벽면에는 풍하중이 0.8kN/m<sup>2</sup>가 작용하는 것으로 가정하여 구조물에 절점 하중으로 작용시켰다.

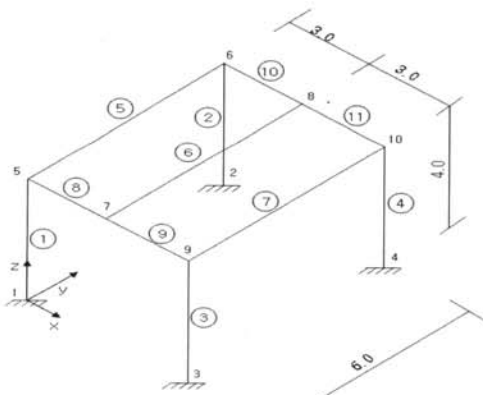


그림 2. 3차원 구조물 해석 모델

3차원 구조물에 대한 최적화 설계결과에 의하면 표 1에 나타난 것처럼 변단면 BH-형강으로 설계하는 것이 사출 압연한 H-형강으로 설계하는 것보다 AISC2005를 기준으로 할 경우 25% 정도 철골량이 줄어들었고, 변단면 BH-형강으로 설계하는 경우에도 AISC2005 기준으로 설계하는 것이 AISC1989 기준으로 설계하는 것보다 20%정도 철골량이 줄어들었다.

그런데, 부재설계를 AISC2005 기준으로 설계할 때에 AISC1989 기준으로 설계할 때보다 H-형강이나 BH-형강으로 설계하는 모든 경우에 보의 춤은 줄어들고 기둥의 춤은 커지는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 H-형강으로 설계하는 경우보다 BH-형강으로 설계하는 경우에 더 현저하게 나타났다.

또, AISC2005 기준에 따라 수정 개발한 프로그램으로 그림 3에 나타난 2차원 구조물에 대한 최적화설계도 허용응력설계법(안전율 1.67 적용)으로 수행하였다.

그림 3에 나타난 10m 간격으로 설치한 2차원 산형 철골구조물에 작용한 하중은 지붕에 고정하중 2kN/m, 적재하중 8kN/m, 풍하중 -8kN/m를 고려하여 등분포하중으로 작용시켰고, 좌측과 우측 기둥에는 등분포 풍하중을 9kN/m와 7kN/m를 각각 작용시켰다. 구조물의 최적화 설계를 위해서 풍하중에 의한 횡변위는 H/200 이하로 제한하고, 보의 처짐은 L/300 이하로 제한하였다.

표 2. 2차원 구조물 최적화설계 결과 비교

설계기준		최적부재		골조 무게		무게 비교					
		번호	단면(mm)	kN	N/m <sup>2</sup>						
AISC 1989	변단면 BH형강	1, 2, 3 18, 19, 20	(650-400)x125x4.0x12x12	30.5	82	1.00					
		4, 17	(550-450)x125x4.0x 8x 8								
		5, 16	(450-550)x125x3.5x 8x 8								
		6, 15	(550-600)x125x4.0x11x12								
		7, 14	(600-450)x125x5.0x10x10								
		8, 13	200x175x2.5x13x13								
		9, 12	(750-700)x125x4.5x 9x10								
		10, 11	(700-350)x125x4.0x 9x11								
		AISC 2005	압연 H-형강				1-8, 13-20	H-336x249x 8x12	48.6	131	1.60
							9-12	H-298x201x 9x14			
변단면 BH형강	1, 2, 3 18, 19, 20		(500-400)x175x3.5x15x15	29.4	79	0.96					
	4, 17		(500-400)x125x4.0x11x11								
	5, 16		(400-450)x125x3.5x 9x 9								
	6, 15		(450-500)x125x4.0x 9x 9								
	7, 14		(500-600)x125x4.5x13x13								
	8, 13		H-350x175x7.0x11								
	9, 12		(600-500)x125x4.5x13x13								
	10, 11		(500-350)x125x3.5x 9x 9								

(주) : BH-H x B x t<sub>w</sub> x t<sub>f</sub> (top) x t<sub>f</sub> (bott.)

(a) 외측기둥 지점이 힌지인 경우

설계기준		최적부재		골조 무게		무게 비교					
		번호	단면(mm)	kN	N/m <sup>2</sup>						
AISC 1989	변단면 BH형강	1, 2, 3 18, 19, 20	(450-800)x325x4.0x19x19	68.7	186	1.00					
		4, 17	800x325x4.5x15x15								
		5, 16	(800-650)x325x4.0x13x13								
		6, 15	(650-600)x325x4.0x14x14								
		7, 14	(600-700)x325x4.5x18x18								
		8, 13	200x175x2.5x12x12								
		9, 12	(700-600)x325x4.5x17x17								
		10, 11	(600-450)x325x4.0x13x13								
		AISC 2005	압연 H-형강				1-8, 13-20	H-692x300x13x20	98.5	266	1.43
							9-12	H-336x249x 8x12			
변단면 BH형강	1, 2, 3 18, 19, 20		(500-700)x300x4.5x24x24	85.9	232	1.25					
	4, 17		650x350x5.0x25x25								
	5, 16		(650-500)x350x5.0x23x23								
	6, 15		(500-450)x350x3.5x26x26								
	7, 14		(450-600)x350x4.5x25x25								
	8, 13		350x175x7.0x11								
	9, 12		(600-450)x350x4.5x24x24								
	10, 11		(450-400)x350x3.5x25x25								

(주) : BH-H x B x t<sub>w</sub> x t<sub>f</sub> (top) x t<sub>f</sub> (bott.)

(b) 외측기둥 지점이 고정된 경우

산형 2차원 구조물에 대한 최적화 설계결과에 의하면 외측 기둥 지점을 힌지로 설계할 경우에 표 2(a)에 나타난 것처럼 변단면 용접(BH)형강에 의한 설계가 압연 H-형강에 의한 설계보다 12% 정도의 철골 절약효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 구조물을 변단면 BH-형강으로 최적설계하는 경우에는 AISC2005 기준으로 부재설계를 하는 것이 AISC1989 기준으로 설계하는 것보다 25% 정도의 철골이 더 필요한 것으로 나타났는데 이것은 부재강도 보다는 풍하중에 의한 구조물의 횡변위가 부재의 크기를 결정하는 요소이

기 때문이었다.

한편, 외측 기둥 지점을 고정으로 설계할 경우에는 표 2 (b)에 나타난 것처럼 변단면 BH-형강에 의한 설계가 압연 H-형강에 의한 설계보다 40% 정도의 상당한 철골 절약효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 변단면 BH-형강으로 구조물의 최적설계를 하는 경우에 AISC2005 기준으로 설계를 하는 것이 AISC1989 기준으로 설계하는 것보다 4% 정도의 철골 절약효과 밖에 없어서 두 기준에 의한 부재설계가 거의 유사하게 나타났다.

그리고 구조물의 부재를 변단면 BH-형강으로 설계할 경우에 AISC2005 새로운 기준으로 설계를 하는 것이 AISC 1989 기준으로 설계하는 것보다 부재 춤이 작게 설계되어서 웨브의 좌굴에는 신기준이 더 안전하게 설계되는 것으로 평가되었다.

## 6. 결론

이 연구에서는 변단면 용접 H-형강(BH-형강) 부재를 갖는 3차원(2차원도 가능) 구조물에 대한 최적화 설계를 위한 컴퓨터 프로그램을 AISC2005 기준에 의거하여 개발하였다. 이 프로그램에서 변단면 구조물 최적화 설계과정은 크게 구조물해석과 부재설계 과정으로 이루어졌다. 구조물해석 과정에서는 부재강성행렬을 수치해석법으로 구하여 통상적인 구조물 해석을 수행하고, 부재설계 과정에서는 최적 부재설계를 위해서 AISC2005 기준에 의거하여 변단면 부재설계를 허용응력 설계법으로 수행하는데, 구조물의 최소 중량화를 위한 최적설계를 위해서 구조물 해석과정과 부재설계 과정을 허용응력조건과 변위조건이 만족될 때까지 반복 수행하였다. 최적부재 선정을 위한 반복적인 부재단면 가정은 비선형 해석에서도 안정적으로 수렴되고 수렴속도가 빠른 할선(Secant)1 수치해석법을 이용하였다.

이 연구에서 개발한 프로그램에 의한 2, 3차원 변단면 구조물의 최적화 설계결과에 의하면 변단면 용접(BH)형강으로 설계하는 것이 사출 압연한 H-형강으로 설계하는 것보다 AISC 기준으로 부재설계를 할 경우 상당한 철골 절약효과가 있는 것으로 나타났다. 또, 변단면 BH-형강으로 설계하는 경우에도 구조물의 종류에 따라 정도의 차이는 있지만 AISC 2005 기준으로 설계하는 것이 AISC1989 기준으로 설계하는 것보다 철골량이 줄어들었고, 부재 춤도 작게 설계되어 웨브의 좌굴에는 새로운 기준이 더 안전한 것으로 평가되었다.

이 프로그램은 AISC2005 기준에 따라 개발되었기 때문에 추후 약간의 보완수정이 이루어지면 강도설계법에 따른 변단면 구조물의 최적화 부재설계도 가능하다.



감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

김용석(1995) 변단면 철골구조 최적화를 위한 자동화설계 프로그램에 관한 연구, 한국강구조공학회논문집, 제7권 제1호, pp.153-159.

김치경(1999) 변단면 PEB를 위한 엔지니어링 데이터베이스의 설계와 구축, 대한건축학회논문집 구조계, 15권 8호(통권130호), pp.3-14.

김호수(1996) 변단면부재와 P.E.B.시스템에 의한 박공형철골조의 최적설계방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 12권 5호(통권 91호), pp.155-166.

심현주 외4인(2007) 춤이 큰 웨브 변단면 H형 보의 휨내력에 대한 실험적 평가, 한국강구조공학회논문집, 제19권 제5호(통권 90호), pp.483-492.

이한주, 김호수, 신호범(2007) 변단면 부재를 이용한 산형 철골조 건물의 최적설계, 대한건축학회논문집 구조계, 제23권 제10호(통권 228호), pp.67-74.

A. Borkowski & S. Jendo(1990) Structural Optimization: Mathematical Programming, Vol. 2, Plenum Press.

AISC(2005) Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05.

C. G. Salmon et al.(1996) *Steel Structures : Design and Behavior, 4th Ed.*, Harper & Row Publishers.

MBMA(2002) Metal Building Systems Manual: Design Practices Code of Standard Practice Guide Specifications Nomenclature.

R. K. Livesley(1975) *Matrix Methods of Structural Analysis, 2ND Ed.*, Pergamon Press.

Z. Friedman and J. B. Kosmatka(1992) Exact Stiffness Matrix of A Nonuniform Beam-I. Extension, Torsion and Bending of a Bernoulli-Euler Beam, *Computers & Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 671-682.

부록. SYMBOLS

$A$	: 단면적
$A_0$	: 변단면 부재의 시점 단면적
$A_f$	: 한쪽 플랜지 단면적
$A_w$	: 웨브의 단면적

$B$	: 단면의 폭
$b_{fc}$	: 압축플랜지 단면폭
$C_b$	: 횡방향 뒤틀림 좌굴 수정계수
$E$	: 탄성계수
$F_a$	: 허용압축응력
$F_{bc}, F_{bc_i}$	: 압축과 인장 플랜지 허용휨응력
$F_e$	: 탄성 임계 좌굴응력
$F_t$	: 허용인장응력
$F_y$	: 부재의 항복강도
$G$	: 전단탄성계수
$h$	: 부재의 높이(단면의 춤)
$h_c$	: 웨브 높이
$h_0$	: 플랜지 중심간의 거리
$H$	: 구조물의 높이
$H_0$	: 변단면 부재의 시점 높이
$H_L$	: 변단면 부재의 종점 높이
$I_x, I_y, I_z$	: x, y, z 축에 대한 단면2차모멘트
$J_0$	: 변단면 부재의 시점 단면회전모멘트
$K$	: 유효좌굴계수
$L$	: 부재의 길이 또는 구조물의 경간
$L_b, L_p, L_r$	: 횡변위나 뒤틀림 방지 지지길이, 항복한계 상태 한계 횡방향 지지길이, 비탄성 횡방향 뒤틀림좌굴 한계상태 한계 횡방향 지지길이
$M$	: 부재의 모멘트
$r$	: 단면2차회전반경
$r_t$	: 압축플랜지와 웨브의 1/6에 대한 유효단면2차회전반경
$S_{xc}, S_{xt}$	: 압축축과 인장축 x축에 대한 탄성단면계수
$S_y$	: y축에 대한 탄성단면계수
$t_f, t_{fc}$	: 플랜지의 두께, 압축플랜지 두께
$t_w$	: 웨브의 두께
$Z, Z_x, Z_y$	: 소성단면계수, x축 y축에 대한 소성단면계수
$\lambda, \lambda_p, \lambda_r$	: 웨브 세장비, 충실웨브 한계세장비, 비충실웨브 한계세장비
$\Omega$	: 안전율

(접수일자 : 2008. 10. 3 / 심사일 2008. 10. 28 / 게재확정일 2009. 1. 29)