

유로코드를 이용한 주름웹보의 최적설계 연구

A Study on Optimum design of Corrugated web girder using Eurocode

손수덕* 유미나** 이승재***
Shon, Su-Deok Yoo, Mi-Na Lee, Seung-Jae

Abstract

This paper describes the structural design and optimization of sinusoidally corrugated web girder by using EUROCODE (EN 1993-1-5). The optimum design methodology and characteristics of the optimal cross-section are discussed. We investigate a shear buckling and the concerned standards for corrugated web and explain the equations to obtain a critical stress according to buckling type. In order to perform optimization, we consider an objective function as minimum weight of the girder and use the constraint functions as slenderness ratio and stresses of flanges as well as corrugated web and deflection. Genetic Algorithm is adopted to search a global optimum solution for this mathematical model. For numerical example, the clamped girder under the concentrated load is considered, while the optimum cross-sectional area and design variables are analyzed. From the results of the adopted example, the optimum design program of the sinusoidally corrugated web girder is able to find the suitable solution which satisfied a condition subject to constraint functions. The optimum design shows the tendency to decrease the cross-sectional area with the yielding strength increase and increase the areas with load increase. Moreover, the corrugated web thickness shows a stable increase concerning the load.

Keywords : Corrugated web girder, Shear buckling, Optimum design, Eurocode, Genetic algorithms

1. 서 론

강구조물의 장경간이나 하중이 비교적 큰 경우는 일반적으로 스틱프너로 보강된 플레이트 거더를 많이 사용한다. 경제적인 설계를 위해 세장해진 웹은 좌굴이라는 문제를 해결해야만 했고, 스틱프너를 이용하여 설계의 한계점을 해결하려 노력하였다. 박판의 웹에서 전단좌굴의 문제는 여러 연구자들에 의해서 다양한 해결방법이 시도되어졌고, 그 중 한 대안이 주름진 웹이다.^{1)~3)} 과거 기술력 부재로 인한 박판 가공의 현실적인 제작의 어려움은 용접 및

자동생산기술의 발전으로 해결되었으며, 가격면에서 경쟁력을 가질 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 스틱프너 없이 웹을 얇게 설계할 수 있는 장점과 피로성능의 개선은 주름웹의 제작비용 상승에도 불구하고 경제적인 장점을 유지할 수 있었다.²⁾

주름진 웹을 플랜지에 용접한 보(이하 주름웹보라 칭함)를 설계할 경우, 기본적으로 유로코드(Eurocode)⁴⁾에 설계법이 제시되어있으며, DIN 18800⁵⁾나 DAST-R015⁶⁾에서도 유사한 설계방법을 제공하고 있다.⁷⁾ 특히, 주름웹의 전단좌굴은 전체좌굴, 국부좌굴 및 연성좌굴과 같이 복잡한 양상으로 정의되며, 보 춤의 변화에 따른 세장한 특성과 이에 따른 최적단면의 예상은 간단하지 않다.

주름웹에 대한 최적화 연구는 Zhang⁸⁾의 열간 압연 WCW(Wholly Corrugated Web) 보의 연구가 있으나 전단좌굴은 고려되지 않았고, 손수덕³⁾의 최적설계연구에서 전단좌굴이 고려된 설계식이 이용

* 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

** 학생회원, 한국기술교육대학교 대학원, 건축공학부 석사과정
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

*** 교신저자, 한국기술교육대학교, 건축공학부 교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education
Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224
E-mail: leeseung@koreatech.ac.kr

되었고, 최적설계 기법의 적용과 적용되어질 기법의 확률변수에 대해 단순보를 대상으로 연구되었다. 그러나 최적단면에서의 전단좌굴응력의 특성은 다루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 유로코드에서 제시되는 전단좌굴응력의 형상에 대한 특성을 살펴 보도록 한다. 대상 예제로는 집중하중을 받는 양단 고정보를 채택하여 최적구조설계를 위한 해석을 수행한다. 유전자 알고리즘을 이용해서 구하여진 해의 유효성은 제약함수 값을 통해서 검증하도록 한다. 본 논문의 구성은 2장에서 사인형 주름웨브의 설계에 대해서 설명하고, 주름웨브의 전단좌굴에 관한 기준, 전단좌굴응력 산정식 및 형상에 대한 값의 변화를 살펴보도록 한다. 3장에서는 최적설계를 위한 수리모형에 대해서 설명하고 목적함수, 제약조건 및 해의 탐색방법을 다루도록 한다. 대상예제에 대해서는 4장에서 소개하고, 최적설계를 수행한 결과에 대해서 고찰하도록 하며, 이상의 결과를 이용하여 5장에서 결론을 제시한다.

2. 유로코드의 주름웨브보 설계

미국이나 일본보다 유럽에서 먼저 상용화된 주름웨브보는 DAST-R015나 DIN 18800들과 더불어 유로코드를 통해서 기본적인 설계기준이 제시되어 왔으며, 플레이트 거더의 설계와 유사하게 휨과 전단을 각각 플랜지와 웨브에서 분담하여 설계하는 방식을 채택하고 있다.

2.1 주름진 판을 이용한 구조물

주름진 판은 1829년 특허를 받은 것을 시점으로 여러 분야에 활발히 적용이 시작되었고, 1930-40년대에 많이 설계된 JU52 수송기의 동체는 주름진 두랄루민 판이 이용되었으며, 오늘날에도 컨테이너 혹은 기차나 격납고 문과 같은 구조물에서 쉽게 볼 수 있다. 일반 구조체에 대한 적용은 1924년 웨브에 적용한 사례로 시작되었고, 유럽 특히, 스웨덴에서는 1960년대 초부터 강제구조물에 많이 이용되었다. 미국에서도 웨브에 주름진 I-형강의 특허가 PACO사에 의해 1981년 특허를 받아 제작되었고, 일반 주택

에 목재와 합성된 구조에 적용되었다. 또한, 1980년 이후부터 주름진 판을 이용한 교량의 개발이 프랑스와 일본에서 진행되어 다양한 형태의 복부 파형 웨브 교량을 건설하였으며, 고성능 강재를 활용하는 방안에 대해서도 연구되었다.^{1)~3)}



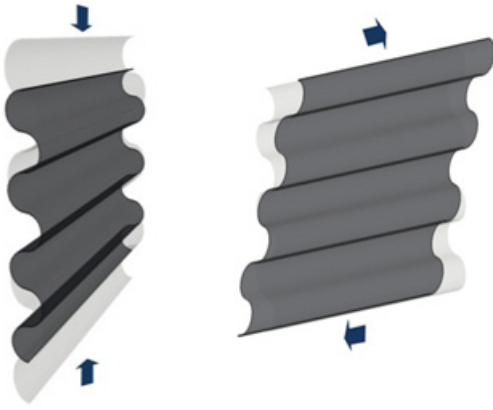
〈Fig. 1〉 Portal frame and Corrugated web

주름웨브보의 설계에서 유럽과 독일의 설계기준들은 휨의 능력과 전단의 능력을 나누어 설계하는데, 이것은 아코디언 효과⁹⁾로 인해 웨브가 축력에 대해서는 저항하기 힘들기 때문이다. 전단좌굴에 대한 설계제한에서도 각 나라마다 조금은 다르게 적용하지만 기본적인 방법은 국부좌굴과 전체좌굴에 대해 더 취약한 좌굴에 저항하도록 설계를 한다. 또한, 연성좌굴이 발생하지 않는 영역에서만 설계하도록 제한하는 경우도 있으며, 오스트리아의 Zeman & Co. 사는 국부좌굴이 발생하지 않는 기본모듈을 제시하여 설계에 응용하고 있다.^{7),10)} 국내의 경우 주름웨브보의 구조설계에 대한 기준은 아직 미비한 상태이다. 마름모형 주름진 판의 전단좌굴에 관한 설계의 경우는 국내에서도 여러 논문에서 언급하고 있다. 그러나 사인형의 경우는 전단좌굴응력에 대한 연구뿐만 아니라, 해석과 설계기준을 다룬 문헌도 미비하다.

2.2 주름웨브의 전단좌굴응력

주름웨브는 주름 한 판에서 발생하는 국부좌굴, 여러 판에 걸쳐 나타나는 전체좌굴 및 이들의 연성좌굴이 발생한다. 전단좌굴은 Easley¹¹⁾이 직교이방성 이론을 이용하여 전체좌굴을 설명할 수 있는 적합한 해를 제시하였고, Elgaaly¹²⁾는 주름웨브에 대한 연구 연혁과 개발에 관해 문헌을 발표하게 되었다. Abbas¹⁾의 연구는 연성 좌굴에 대한 특성과 제한식을 해석적인 방법으로 연구하였으며, 초기형상

불완전량에 따른 영향을 다루었고 Driver¹³⁾의 전단좌굴에 대한 설계범주 제안과 더불어 많은 연구가 진행되었다.^{14),15)} 또한, 국내에서도 마름모형 주름웹브의 전단좌굴에 대해서 연구가 진행되었다.^{16)~19)}



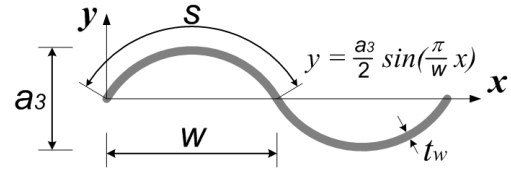
<Fig. 2> Accordion effect and shear behavior

아코디언 효과와 더불어 복잡한 전단좌굴거동에 대한 설계기준의 범위와 이들의 특성은 한가지로 정의하기는 어렵다. 그러나 대부분의 기준에서 마름모형 주름의 국부좌굴응력은 Timoshenko & Gere의 공식이 사용되었고, 경계조건은 단순지지로 가정되었다. 비탄성영역에 관해서 일본기준의 경우는 국부전단좌굴이 전단항복응력 이하에서 발생하지 않을 조건의 형상을 제안하고 있다.²⁰⁾ 그러나 사인형의 경우 형상의 매끄러움으로 인해 전단좌굴에 대한 저항능력은 마름모형 주름보다 크다고 보고된 바 있다.

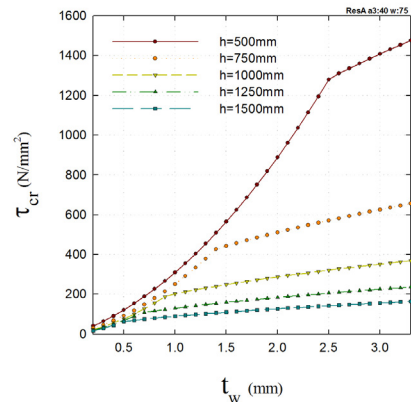
사인형 주름웹브의 경우 유로코드에서는 전체좌굴 및 국부좌굴에 대한 좌굴응력을 식(1)과 같이 제안하고 있다. 여기서, 주름의 형상파라미터는 <Fig. 3>과 같이 파고($a_3/2$), 파장(w, s) 그리고 웹의 두께(t_w)로 정의되며, 사인형 주름의 형상함수, 한 파장에 대한 길이를 각각 y, s 라 한다.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad (1a)$$

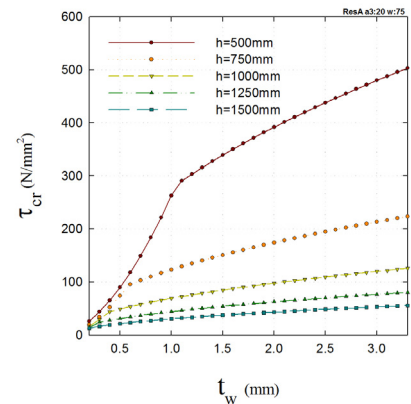
$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_y^3} \quad (1b)$$



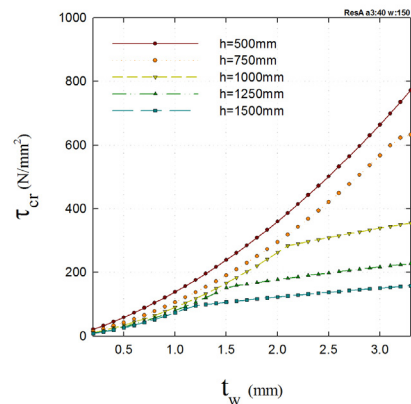
<Fig. 3> Parameters of Sinusoidal corrugation



(a) $a_3 = 40\text{mm}$, $w = 77.5\text{mm}$



(b) $a_3 = 20\text{mm}$, $w = 77.5\text{mm}$



(c) $a_3 = 40\text{mm}$, $w = 150.0\text{mm}$

<Fig. 4> Shear buckling stress

여기서, $\tau_{cr,l}, \tau_{cr,g}$ 은 각각 국부좌굴 및 전체좌굴 응력이며, D_x, D_y 는 각각의 축에 대한 단위 휨강성이다. 사인형 주름웨브보의 경우 유럽에서 많이 소개되고 활용되어진 형상의 범위는 $a_3 \leq 40mm$ 와 $77.5mm \leq w \leq 155mm$ 이다.

식 (1)을 이용하여 여러 형상에 대한 전단좌굴응력을 계산하면 <Fig. 4>와 같이 나타난다. 그림에서 나타난 곡선은 식 (1)에서 계산된 국부좌굴과 전체좌굴의 응력 중에서 작은 값을 나타낸 것으로 변곡점 이후의 곡선은 전체좌굴이 국부좌굴응력보다 낮게 계산된 경우이다. 그림에서 볼 때, Eurocode에서 제안된 전단좌굴응력은 주름의 형상에 따라 저항능력이 다르게 나타난다. 각각의 형상에 대해서 얇은 두께의 경우 국부좌굴의 영향을, 두꺼운 두께에서는 전체좌굴의 영향에 의해서 결정된다.

2.3 사인형 주름웨브보의 전단설계

사인형 주름웨브보의 전단에 대한 설계개념은 유로코드의 경우 식(2)와 같다. 여기서 계수 κ 는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 제한세장비에 따라 결정되는 감소계수이다.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (= V_{Rk}/\gamma_M) \quad (2a)$$

$$V_{Rk} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \kappa \cdot f_{y,w} \cdot h_w \cdot t_w \quad (2b)$$

감소계수를 결정하기 위해서는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 좌굴응력과 이에 따른 세장비로 결정이 되며, 다음식과 같다.

$$\kappa_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leq 1.0 \quad (3a)$$

$$\kappa_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (3b)$$

여기서,

$$\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \tau_{cr,l(g)}}}$$

Pasternak²⁾과 Siokola⁷⁾는 사인형 주름의 경우 국

부좌굴은 고려되지 않고 전체좌굴에 대해서만 고려하며, 제안된 전체좌굴의 설계식은 EN 1993-1-5와 유사한 설계범위를 나타낸다. 또한, 국부좌굴의 경우 EN 1993-1-5가 DAST-R015의 기준보다 감소계수의 영역은 낮더라도 설계영역은 크게 나타나는 것으로 보고되고 있으며, 전체좌굴의 경우 연성구간에 서 더 불리한 조건이 적용된다.³⁾

3. 유전자 기법을 이용한 최적화 방안

사인형 주름웨브보의 최적설계를 위해서 목적함수 및 제약조건을 설명하도록 한다. 또한, 적합도 함수와 전역 최적해 탐색기법인 유전자 알고리즘^{3),21)~23)}에 이용되는 연산자도 함께 설명한다.

3.1 목적함수와 제약조건

구조물의 최소중량을 목적으로 하는 최적화 문제는 식(4)와 같이 정의할 수 있으며, 모든 부재가 동일한 재료를 사용할 경우 단일 부재의 목적함수는 단면적만으로 구성할 수 있다.^{3),24)}

$$\text{minimize } F(\mathbf{x}) = \rho_i A(\mathbf{x})_i L_i \quad (4a)$$

$$\text{subject to } g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (4b)$$

$$\mathbf{x}^{low} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{high}$$

여기서,

$$\mathbf{x} = \{b_f, t_f, h_w, t_w\}^T: \text{설계변수벡터}$$

$$\rho_i, A(\mathbf{x})_i, L_i: i \text{ 부재의 단위중량, 단면적, 길이}$$

$$A(\mathbf{x})_i = \left\{ 2 b_f t_f + h_w t_w \frac{s}{w} \right\}_i$$

$$g_j(\mathbf{x}), \mathbf{x}^{low}, \mathbf{x}^{high}: \text{제약함수와 변수의 경계조건}$$

제약조건은 웨브와 플랜지의 판-폭두께비 제약함수 (g_1, g_2) 및 부재력 제약함수 (g_3, g_4) 그리고 처짐 제약함수 (g_5)로 식(5)와 같다.³⁾

$$g_1(\text{or } g_2) = \frac{\lambda_{p(\text{or } f)}}{\lambda_{p(\text{or } f), \max}} - 1.0 \leq 0 \quad (5a)$$

$$g_3(\text{or } g_4) = \frac{V(\text{or } N)_{Sd}}{V(\text{or } N)_{Rd}} - 1.0 \leq 0 \quad (5b)$$

$$g_5 = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\lim}} - 1.0 \leq 0 \quad (5c)$$

여기서,

$$\lambda_p = 0.8 \left(\frac{h_w}{t_w} \right) \sqrt{\frac{f_y}{\kappa_{cr,l} E}}, \quad \lambda_{p, \max} = 0.316 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_f = \frac{b_f + a_3}{t_f}, \quad \lambda_{f, \max} = 1.03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

3.2 적합도와 벌칙함수

자연계에서 나타나는 유전과정을 모방한 유전자 알고리즘은 설계변수집합의 선택(selection), 교차(crossover) 및 돌연변이(mutation)연산을 거쳐 다음 세대의 설계변수집합의 생성 과정을 통해 전역 최적 해를 탐색한다. 이중 실변수 유전자 알고리즘은 설계변수가 이진수가 아닌 실수로 이루어지므로 이진화(Encoding)와 십진화(Decoding)과정이 필요 없어 적용이 간단하다.³⁾

식 (4)의 목적함수와 제약조건을 벌칙함수와 적합도(fitness)를 이용하여 표현하면 식 (6)과 같다. 여기서, g_i 및 q 는 벌칙함수의 증가계수 및 승수이며, 제약을 위반하였을 경우 벌점이 부과된다.

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{c_2}{c_1 + \{F(\mathbf{x}) + r_p P(\mathbf{x})\}} \quad (6a)$$

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \{g_i(\mathbf{x})\}^q + \sum_{j=1}^n \{g_j(\mathbf{x})\}^q \quad (6b)$$

자식세대($\mathbf{x}^{offspring}$)는 부모세대(\mathbf{x}^{parent})로부터 선택, 교차 및 돌연변이 등의 연산과정을 통해 형성되며, 각각의 연산과정들은 수렴도를 높이거나 우수한 형질을 유지하는 등의 목적으로 연산을 수행한다. 특히 유전연산에서 확률변수는 매우 중요하며, 개체의 수와 세대수에 비례하여 해석의 정밀도를 높일 수 있다. 또한 국소 최적점이 많은 경우 전역 최적해를 구하기 위해서는 세대수를 높여야만 한다. 그러나 개체수와 세대수의 증가는 유전자 알고리즘의 연산량을 증가시키는 결과를 낳게 되므로 적절한 파라메타의 선택이 필요하다. 본 연구에서는 교차, 돌연변이, 엘리트전략 및 이계교배 연산자를 사용하

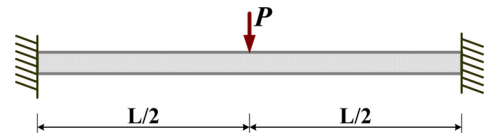
도록 하며, 교차확률변수는 0.125, 돌연변이 확률변수는 0.2, 이계교배 섭동벡터는 설계영역의 10%를 적용하였다. 또한 200개의 개체를 이용하였으며, 세대수는 1000으로 채택하였다. 해의 평가를 위해서는 제약조건식의 위배에 대해서 만족하는지를 검토하여 유효성을 검증하도록 한다.

4. 단순보 예제의 최적구조설계

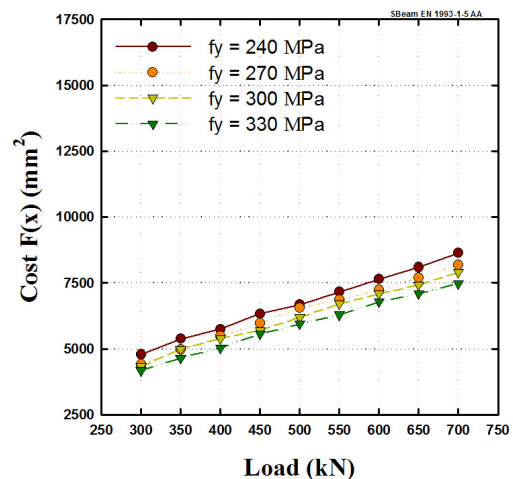
집중하중을 받는 사인형 주름웹브보의 최적구조설계를 본 절에서 수행하도록 한다. <Fig. 5>와 같은 양단고정 경계조건을 가진 단순보의 스펠(L)은 10m이고 집중하중(P)이 작용하며, 하중조합에 대한 계수는 고려하지 않는다. 탄성계수(E)와 포와송비(ν)는 각각 210 GPa 및 0.3이다. 주름은 형상변수가 각각 $a_3 = 40$ mm와 $w = 77.5$ mm을 이용하기로 한다. 해석을 수행하기 위한 설계변수의 상·하한치는 식(7)과 같고, 처짐은 $\delta_{\lim} = L/300$ 로 제한한다.

$$10 \text{ mm} \leq b_f(\text{or } h_w) \leq 3000 \text{ mm} \quad (7a)$$

$$1 \text{ mm} \leq t_f(\text{or } t_w) \leq 300 \text{ mm} \quad (7b)$$



<Fig. 5> Clamped beam example



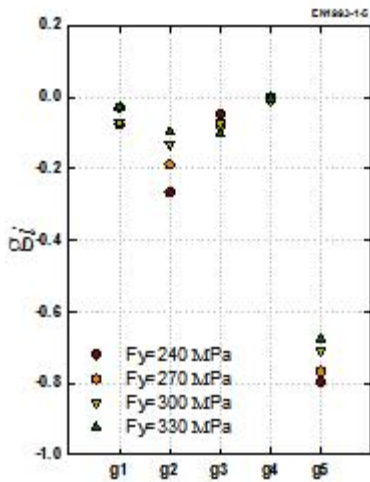
<Fig. 6> Results of optimum design

예제에서 적용될 하중은 $P = 300 - 700$ kN의 범위에서 50 kN씩 증가된 량을 적용하였으며, 항복응력 f_y 는 240, 270, 300, 330 MPa이다.

<Fig. 6>의 해석결과에서 항복강도가 증가할수록 최적단면적은 작아지며, 하중의 증가에 따라 최적단면적은 증가한다. 그림에서 나타난 결과의 값은 표 1과 같고 $f_y = 240$ MPa의 700 kN일 때 8630.4 mm²로 가장 큰 값을 나타내었다.

<Table 1> Optimal cross-section area (mm²)

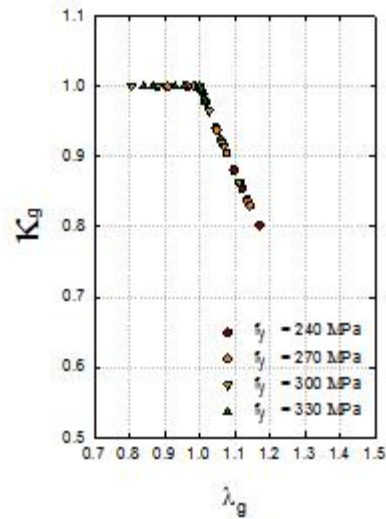
| $P \backslash f_y$ | 240 MPa | 270 MPa | 300 MPa | 330 MPa |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|
| 300 | 4788.4 | 4408.1 | 4339.8 | 4186.4 |
| 350 | 5386.9 | 4968.3 | 4991.2 | 4648.0 |
| 400 | 5744.1 | 5476.9 | 5388.3 | 5045.5 |
| 450 | 6335.0 | 5974.8 | 5702.8 | 5569.6 |
| 500 | 6680.7 | 6553.8 | 6194.8 | 5945.9 |
| 550 | 7162.4 | 6859.8 | 6710.4 | 6296.4 |
| 600 | 7645.5 | 7229.5 | 7089.6 | 6788.2 |
| 650 | 8096.4 | 7706.7 | 7421.5 | 7095.9 |
| 700 | 8630.4 | 8185.1 | 7904.5 | 7474.5 |



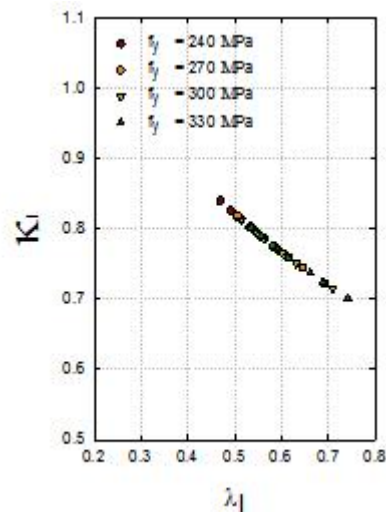
<Fig. 7> Values of Constrain function

최적설계에 따른 제약조건식의 값의 분포를 알아보기 위해서 설계 변수에 대한 항복강도별 제약함수의 평균값을 <Fig. 7>에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 플랜지의 축력에 대한 제약 g_4 가 0에 가장 가까운 값으로 나타났으며, 다음으로 웨브의

세장비 제약 g_1 , 그 다음으로는 웨브의 전단력 제약 g_3 가 0에 근접한 값을 보였다. 여기서 제약함수가 0에 가까운 것은 제약조건에 매우 근접하게 설계되는 것을 의미한다. 그림의 결과에서 볼 때, 본 연구에서 적용되어진 유전자 알고리즘은 설계영역에 부합되는 결과를 얻었으며, 제약조건을 위배하지 않는 설계영역에서의 근사 최소값을 얻을 수 있었다. 확률론적 방법론을 기반으로 하는 유전자 알고리즘의 경우 국소 최적해에서 벗어나기 위해서 돌연변이연산을 수행하며, 개체수와 세대수를 높여 보다 엄밀한 최적점에 수렴할 수 있다.



(a) Global buckling



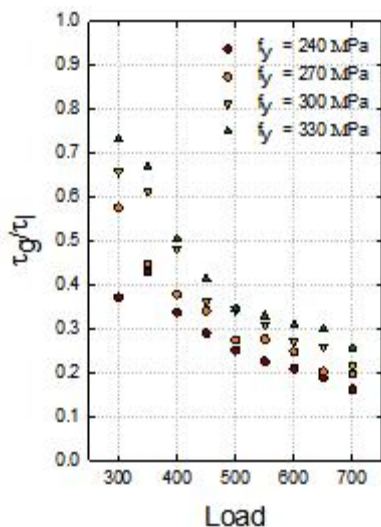
(b) Local buckling

<Fig. 8> Reduced factor for design

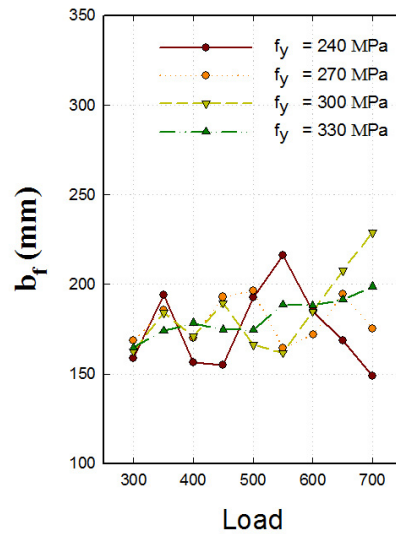
해석을 통해 얻은 최적단면적에 대해서 주름웹보의 세장비가 어떠한 분포로 나타나는지를 알아보기 위해 식(2)의 감소계수인 κ 값의 분포도를 <Fig. 8>에 나타내었다. <Fig. 8>(a)에서 전체좌굴은 세장비 λ_y 가 0.81~1.17의 범위에서 감소계수는 0.8~1.0으로 나타났으며, <Fig. 8>(b)의 국부좌굴의 경우는 세장비 λ_1 가 0.47~0.74의 범위에서 감소계수는 0.71~0.84로 나타났다. 그림에서 볼 때 최적구조설계를 통해 얻은 최적단면적은 대부분 국부좌굴에 의해서 감소계수가 결정되었음을 알 수 있다.

이와 같은 결과에 대해서 국부좌굴과 전체좌굴에

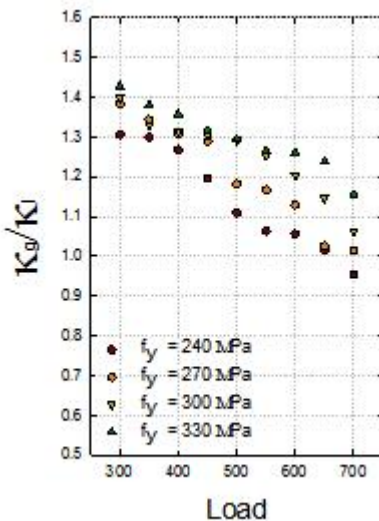
대한 전단좌굴응력의 비율과 감소계수의 비율을 그림 9에 나타내었다. <Fig.9>(a)에서 전단좌굴응력의 비율은 0.15~0.75로 나타났으며, $f_y=240\text{MPa}$ 의 경우 전단좌굴응력비율은 약 0.7에서 약 0.15까지 점점 감소하였다. <Fig.9>(b)에서 국부좌굴에 대한 전체좌굴의 감소계수 비율은 대부분의 모델에서 1.0을 넘는 것으로 나타났으며, 이것은<Fig.8>에서 설명한 바와 같이 국부좌굴에 의해서 결정되어지는 값임을 알 수 있다. <Fig.8>과 <Fig.9>의 결과에서 볼 때 집중하중을 받는 양단고정보의 경우 주름웹보의 최적설계는 국부좌굴에 의해서 감소계수가 결정되었다.



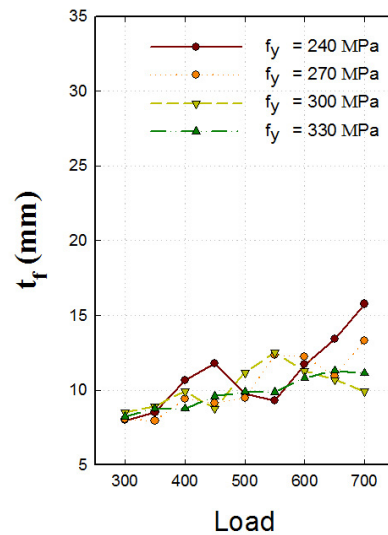
(a) Buckling stress



(a) Width (b_f)



(b) Reduced factor

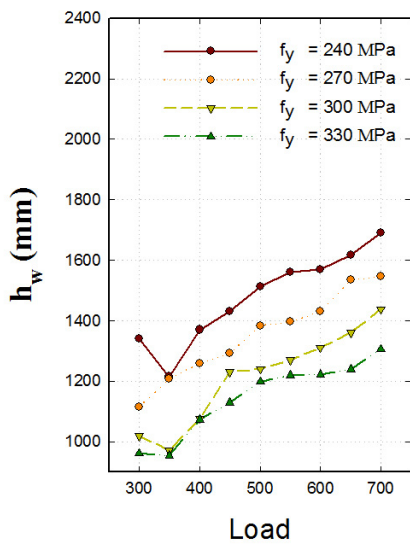


(b) Thickness (t_f)

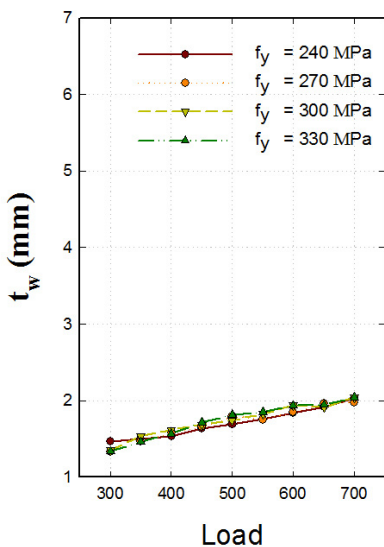
<Fig. 9> Ratio of Stress and Factor

<Fig. 10> Result of optimum design(Flange)

<Fig. 10>과 <Fig. 11>은 최적설계 결과로서 하중의 증가에 따른 최적단면의 설계변수 변화를 그래프로 나타낸 것이며, <Fig. 10>은 플랜지의 설계변수의 변화를, <Fig. 11>은 웨브의 설계변수의 변화를 나타낸 것이다. 하중의 증가에 따라 단면적이 증가하는 경향을 볼 때 설계변수의 증가하는 경향은 최적설계결과와 부합한다. 또한 다른 설계변수와는 달리 웨브의 설계변수는 목적함수가 하중에 따라 증가하는 것과 유사하게 변화하고 있으며, 웨브의 두께는 항복강도의 변화에 관계없이 안정적으로 증가하는 경향을 살펴볼 수 있다.



(a) Height (h_w)



(b) Thickness (t_w)

<Fig. 11> Result of optimum design(Web)

플랜지는 휨을, 웨브는 전단력을 담당하는 설계방법을 최적화에 적용하였으며, 주름웨브의 높이가 높아질수록 휨에 대한 플랜지의 저항능력은 커지게 되는 것은 당연하다. 이것은 때로 설계하중이 증가하더라도 최적설계를 만족하는 플랜지의 두께와 폭이 낮아지기도 하며, 반대의 경우도 발생한다. 이와 같은 국소 최소점들은 전단력과 모멘트의 크기와 비율에 따라 다르게 나타나며, 전역최적화 기법을 적용하여 해를 구하는 경우 확률변수나 세대수의 증가에 따라 차이는 있을 수 있다. 그러나 본 연구의 최적단면적 결과에서 볼 때, 하중의 증가에 따른 최적단면적의 증가와 항복강도의 증가에 따른 최적단면적이 감소하는 매우 이상적인 경향의 결과를 나타내고 있으며, 설계변수들은 제약조건의 한계를 넘지 않는 비교적 세장하면서도 필요한 부재응력을 모두 감당할 수 있는 단면적의 결과를 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 유로코드를 이용한 사인형 주름웨브의 최적설계를 다루었으며, 최적단면에 대한 전단좌굴응력에 대해서 고찰하였다. 목적함수로 최소중량을, 제약함수로 세장비, 부재력 및 처짐을 채택하였으며 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해를 탐색하였다. 대상예제로 집중하중을 받는 양단고정보를 이용하였으며, 해석결과에 대해서 분석하였다. 주름웨브의 최적설계 프로그램은 해석결과에서 볼 때 안정적인 해를 얻을 수 있었으며, 최적단면에 대한 제약함수는 제시된 설계조건을 위배하지 않는 유효한 단면 값을 얻을 수 있었다. 대상예제의 해석 결과는 항복강도의 증가에 따라 최적단면적이 감소하였고, 하중의 증가에 대해서는 단면적이 증가하는 결과를 보였다. 또한, 하중의 증가에 따라 웨브 두께는 안정적인 증가결과를 보였으며, 유로코드에 의한 주름웨브의 전단설계는 채택된 예제의 경우 국부좌굴에 의해서 감소계수가 결정되었다. 본 논문의 최적단면의 특성 분석은 주름웨브의 최적설계를 위한 설계특성을 분석하여 설계기준에 반영하기 위한 기초연구이며, 경제적이며 좌굴의 안정성을 확보할 수 있는 설계 방법론을 찾기 위해서는 다양한 하

중조건과 경계조건에 대한 분석이 더 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

“본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(12첨단도시16)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.”

참고문헌

1. Abbas, H.H., Sause, R., and Driver, R.(2002), Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders, Proceedings, Structural Stability Research Council, 361-387
2. Pasternak, H. and Hannebauer, D.(2004), 4. Trager mit profilierten Stegen, Stahlbau Kalender 2004, Ernst & Shon, German, 449-492
3. Shon, S.D. and Lee, S.J.(2011), Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-valued Genetic Algorithm, Journal of Korea Society of Steel Construction, Vol 23(5) 581-593
4. EN 1993-1-5, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5 Plated structural elements, 1993
5. DIN 18800, Stahlbauten Teil 1-3, German, 1990
6. DASt-Richtlinie 015, Trager mit schlanken Stegen, Stahlbau-V., German, 1990
7. Siokola, W., Wellstegtrager Technische Dkumentation, 2. Auflage, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Wien, 1999
8. Zhang, W., Li, Y., Zhou, Q., Qi, X., and Widera, G.E.O.(2000), Optimization of the Structure of an H-beam with either a Flat or a Corrugated Web: Part3. Development and Research on H-beams with Wholly Corrugated Webs, Journal of Materials Processing Technology, Vol 101, 119-123
9. Oh, J.Y., Lee, D.H., Kim, K.S. and Hwang, J.H.(2011), Analytical Study on the Accordion Effect of Steel Beams with Corrugated Webs, 2011 Conference of Korea Society of Steel Construction, 285-286
10. Pasternak H. and Kubieniec. G.(2010), Plate girders with corrugated webs, Journal of civil engineering and management, Vol 16(2), 166-171
11. Easley, J.T. and McFarland, D.E.(1969), Buckling of Light-gage Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95(ST7), 1497-1516
12. Elgaaly, M. and Dagher, H.(1990), Beams and Girders with Corrugated Webs, Proceedings, SSRC Annual Technical Session, Bethlehem, PA, 37-53
13. Driver, R., Abbas, H.H. and Sause, R.(2006), Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 132(2), 195-203
14. Moon, J., Yi, J., Choi, H.H. and Lee, H.E.(2009), Shear Strength and Design of Trapezoidally Corrugated Steel Webs, Journal of Constructional Steel Research, Vol 65, 1198-1205
15. Chan, C.L., Khalid, Y.A., Sahari, B.B. and Hamouda, A.M.S.(2002), Finite Element Analysis of Corrugated Web Beams under Bending, Journal of Constructional Steel Research, Vol 58, 1391-1406
16. Kim, S.N., Jeon, J.S., Nguyen, N.B. and Kang, Y.J.(2008), Study on Torsional Behavior of I-Girder with Corrugated Webs, 2008 Conference of Korea Society of Steel Construction, 407-410
17. Nguyen, N.D., Han, S.R. and Kang, Y.J.(2011), Lateral-torsional buckling

- strength of tapered I-girder with corrugated webs under uniform moment, 2011 Conference of Korea Society of Steel Construction, 121-122
18. Ji, H.S.(2011), Buckling Behaviors of Plate Girder with Corrugated Steel Web, Journal of Korea Society of Steel Construction, Vol 23(2), 221-228
19. Lee, J.M., Kim, S.N., Han, K.H. and Kang, Y.J.(2009), Analysis of Torsional Behavior of Corrugated Web I-girder, 2009 Conference of Korea Society of Steel Construction, 119-120
20. Hyun, G.H.(2003), Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges, Masters thesis, Korea University,
21. Kim, J.S. and Shon, S.D.(2001), A Study of the Optimum Design for Gable Steel Frame using GA and Dynamic Optimization, Journal of Architecture Institute of Korea (Structure), Vol 17(11), 51-58
22. Lee, M.S., Yun, Y.M. and Shon, S.D.(2006), Fuzzy Optimum Design of Plane Steel Frames Using Refined Plastic Hinge Analysis and a Genetic Algorithm, Journal of Korea Society of Steel Construction, Vol 18(2), 147-160
23. Kim, D.H. and Lee, J.H.(2011), Optimum Design of Grid Structures with Pretension , Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol 11(1), 77-85
24. Shon, S.D., Lee, S.J. and Choi, J.H.(2012), Optimum Structural Design of Space truss with consideration in Snap-through buckling, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol 12(2), 89-98

(접 수 일 자 : 2012년 08월 20일)

(심사완료일자 : 2012년 11월 30일)

(게재확정일자 : 2012년 11월 30일)