

실변수 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계

Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-valued Genetic Algorithm

손 수 덕¹⁾ · 이 승 재²⁾
Shon, Su Deok · *Lee, Seung Jae*

요 약 : 스티프너로 보강된 플레이트 거더 대신에 주름 웹보를 사용하는 근본적인 장점은 얇은 판으로 형성된 편평한 웹보에서 발생하는 좌굴에 관한 불안정 문제를 해결할 수 있는 것 뿐 아니라 수직 스티프너의 필요성도 함께 해결 됨으로써 경제적인 장점을 제공받게 된다. 따라서 본 연구에서는 사인형 주름 웹보를 가진 보의 구조설계 기법과 실변수 알고리즘을 이용하여 최적화 문제를 다루도록 한다. 구조설계과정과 설계변수들은 EN 1993-1-5, DAST-R015 및 Pasternak 등(2004)을 통해서 구성하며, 주름 웹보의 전단좌굴에 대한 유효한 설계가능영역에 대해 비교, 고찰한다. 구조설계 최적화를 위해서, 목적함수는 사인형 주름 웹보의 중량으로 정의하여 최소중량최적화를 수행하며, 제약 조건으로는 세장비, 부재력 저항능력 및 보의 허용처짐에 대해서 고려한다. 최종적으로 등분포 하중의 단순보 모델을 해석 대상으로 채택하며, 유전자 연산에 있어서 효율적인 확률변수에 대해 연구한다.

ABSTRACT : The underlying advantages of using thin-walled corrugated webs instead of plate girders with stiffeners are the elimination of instability problems associated with buckling of the thin-walled flat plate, and elimination of the need for transverse stiffeners, which also results in economic advantages. This paper focuses on two aspects related to the structural design technique for sinusoidal corrugated web steel beams, and the optimum design of the beams using real-value genetic algorithms. The structural design process and design variables used in this optimization were composed with EN 1993-1-5, DAST-R015 standard and Pasternak et al. (2004), and the valid design capacity of shear buckling of the standards were compared. For the optimum structural design, the objective function, presented as the full weight of the sinusoidal corrugated web beams, and the slenderness, member forces, and maximum deflection of the beam, were considered constraints. Finally, the simple beam under the uniform load was adopted as a numerical example, and the effective probability parameters of the genetic operators were considered to find the global minimum point.

핵심용어 : 사인형 주름 웹보, 전단좌굴, 최적설계, 실변수 유전자 알고리즘, 이계교배

KEYWORDS : sinusoidal corrugated web, shear buckling, optimum design, real-valued GA, out-breeding

1. 서론

강구조물에서 장스팬이나 하중이 비교적 크게 작용하는 경우는 스티프너로 보강된 플레이트 거더를 많이 사용한다. 그러나 세장한 웹보는 좌굴 문제를 본질적으로 내포하고 있으며, 이를 해결하기 위한 대안으로 연구된 것이 주름진 웹보이다. 주름진 판은 영국의 Palmer사에 의해 1829년 특허를 받은 것을 시점으로 여러 분야에 활발한 적용이 시작되었고,

오늘날에도 컨테이너 혹은 기차나 격납고 문과 같은 구조물에서 주름진 판의 적용은 쉽게 볼 수 있게 되었다. 일반 구조물에 대한 주름의 적용은 항공학의 결과물들을 1924년에 받아들여 웹보에 적용한 사례로 시작되었으며, 유럽, 특히 스웨덴에서는 1960년대 초부터 일반적인 강구조물에 많이 이용되었다(Pasternak 등, 2004).

유럽에서의 활발한 기술 적용은 미국이나 일본보다 먼저 상용화된 까닭에 주름진 웹보를 플랜지에 용접한 보를 설계할

1) 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수, 공학박사(sdshon@kut.ac.kr)
2) 교신저자. 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
(Tel: 041-560-1334, Fax: 041-560-1224, E-mail: leeseung@kut.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

경우, 기본적으로 EN 1993-1-5(1993)과 DIN 18800 T1-3(German)나 DASt-R015(German)의 규준에 의해 설계되도록 제도화 되어있다. 또한, 부재설계에서 주름웨브가 아코디언 효과를 지닌 점 등을 이용하여 중심축을 따라서 발생하는 휨이 원활히 전달되지 않은 까닭에 휨 모멘트는 플랜지에서 주름이 잡힌 웨브는 단지 전단력만 감당하게 설계하는 방안이 일반적으로 제시되어 있다.(Siokola, 1999)

주름은 주로 제형(Trapezoidal)이거나 사인(Sinusoidal) 형이 가장 많이 설계되었다.(Abbas, 2003) 박판의 주름은 사인형의 경우 주름의 깊이를 늘이는데 제형 주름보다 제작상의 한계를 가지게 되므로, 비교적 큰 전단력이 작용되는 경우에는 제형으로 많이 제작되었다. 얇은 두께로 인한 전단좌굴의 불안정성은 웨브 높이 및 파형에 따라 영향을 받으며, 국부좌굴과 전체좌굴 및 이들의 연성으로 좌굴이 발생한다. 주름진 웨브에 대한 연구는 주로 전단좌굴거동과 안정성, 주름진 웨브 보의 휨에 대한 단성 횡좌굴 그리고 피로하중에 대한 거동과 피로수명의 개선에 대한 연구가 많이 수행되었다. 특히 초기 불완전성은 전단좌굴을 일으키기에 충분히 민감하며, 제작된 주름진 웨브 보의 완전성 및 형태에 대한 좌굴성능의 검증은 매우 중요한 요인이 된다.

전단좌굴에 관한 연구는 Easley 등(1969)이 직교이방성 이론을 이용하여 전체좌굴을 설명할 수 있는 적합한 해를 가 제시하였고, 실험을 통해 이를 증명하였으며, 이후 Elgaaly 등(1990)은 주름 웨브에 대한 연구 연혁과 개발에 관해서 문헌을 발표하게 되었다. 또한 Abbas 등(2002)의 연구는 연성 좌굴에 대한 특성과 제한식을 해석적인 방법으로 연구되었으며, 초기형상 불완전량에 따른 영향을 다루었다. Driver 등(2006)은 복부 주름 웨브 교량의 전단좌굴에 대한 설계범주를 제안하였고, Moon 등(2009)은 이보다 좋은 평가를 할 수 있는 전단강도를 제안하였다. 원형 주름에 대해서는 Chan(2002)에 의해 보다 정확한 해석과 편평 웨브에 비해 주름이 주는 강성의 개선을 해석적 방법과 실험적 결과가 비교되었으며, 해석 대상이 된 주름 형상은 수직과 수평 원형 주름을 탄소성영역까지 고려하여 다루었다. 국내에서도 사인형 주름은 제형 주름에 비해 많지는 않지만 해석적 연구가 진행되고 있다.(김성남 등, 2008; 이재민 등, 2009; 뉴웬 녹 용 등, 2010)

주름 웨브를 갖는 보의 최적화에 관한 연구로는 Zhang 등(2000)에서 열간 압연 WCW(Wholly Corrugated Web) 보의 최적 단면을 정의하기 위한 연구가 진행되었다. 특히 편평한 웨브의 H-형강의 최적화를 바탕으로 WCW H-형강 보의 최적 파라미터 집합을 개발하고, 주름 파라미터의 영향에 대해서 연구하였다. 여기서 주름진 웨브 보의 축력에 대한 보

의 좌굴저항능력이 편평한 보에 비해 1.5-2배가량 높다는 것을 Li 등(2000)의 논문을 인용해 설명하였고, 여기서 제시한 등가 좌굴강도 이론식은 단면적과 단면 높이로 무차원화된 목적함수로 이용되었다. 그러나 주름 웨브의 두께에 대한 파고의 높이제한이 2배에서 4.6배의 영역만이 제약조건에서 적용하였으며, 이것은 WCW H-형강의 열간압연생산에 관한 일반사항을 고려한 것으로서, 박판의 주름 웨브를 편평한 플랜지에 용접하여 제작하는 경우, 단면에 대한 제한의 폭이 사실상 이와는 다르다. 또한 얇은 주름의 웨브는 전단좌굴에 대한 저항능력이 설계의 주요인자가 되며, 이를 고려한 최적구조설계는 아직 연구된 바 없다.

따라서 본 연구는 사인형 주름 웨브 보의 최적구조설계 방안을 제시하고, 전역최적화 기법을 적용한 프로그램의 개발을 목적으로 한다. 여기서 최적구조설계를 위한 수리모형은 중량 최적화를 목적함수로 하며, 전역해의 탐색은 이진화 및 심진화 과정이 필요 없는 실변수 유전자 알고리즘을 이용하여 해를 탐색하도록 한다. 또한 단순보 예제에 적용하여 해의 유용성 및 신뢰성과 매개변수의 변화와 적용 특성을 살펴보고자 한다. 논문의 구성은 1장에서 연구동향과 연구목적, 2장에서는 적용될 사인형 주름 웨브 보의 설계방법과 기존의 규준에 따른 전단좌굴에 대한 설계 범주의 특성과 범위들을 비교하며, 3장에서는 최소중량을 만족하는 최적구조설계 수리적 모형과 적용되어진 실변수 유전자 알고리즘을 설명한다. 최종적으로 4장에서 단순보의 예제에 대한 적용과 결과의 분석을 수행하여, 최적구조설계의 방안에 대한 연구의 결론을 5장에서 다룬다.

2. 사인형 주름 웨브 보의 설계규준

주름진 웨브를 플랜지에 용접하여 사용하는 보는 미국이나 일본보다 유럽에서 먼저 개발되고 자동차생산으로 인해 상용화 된 까닭에 기본적인 설계를 DASt-R015, DIN 18800 T.1-3 및 EN 1993-1-5에 정의된 코드로 체계적으로 설계를 수행할 수 있다. 또한, Pasternak 등(2004)의 문헌에서는 부재설계에서 DASt-R015와 EN 1993-1-5의 주름보에 대한 D항을 대신할 수 있는 식들에 대해 설명하고 있다. 본 절에서는 사인형 주름 웨브 보의 설계변수에 대해서 정의하고, 위의 규준들이 제시하는 단면저항능력에 대해서 살펴본다. 또한 주름 웨브의 전단좌굴안정성을 고려한 설계영역들을 규준별로 비교하여 설계메커니즘에 대해서 고찰한다.

사인형 주름 웨브에 대한 설계를 위해서 형상파라미터를 정의하면, 그림 1과 같이 파고($a_3/2$), 파장(w, s) 그리고 웹의 두께(t_w)로 정의 할 수 있으며, 사인 형상의 주름함수(y),

한 파장에 대한 길이(s) 및 주름진 웹의 단면이차모멘트(I_x)는 식 (1)-(3)과 같이 각각 정의할 수 있다. 여기서, 상·하 플랜지는 두께(t_f)와 폭(b_f)이 같은 것으로 가정한다.

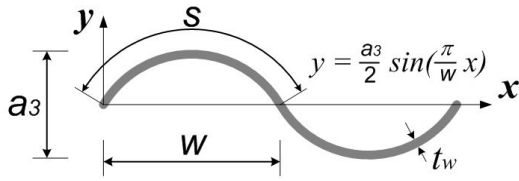


그림 1. 사인형 주름 형상과 형상 파라메타

$$y = \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w} x\right) \quad (1)$$

$$s = \int_0^w \sqrt{1 + \left\{ \frac{a_3 \pi}{2w} \cos\left(\frac{\pi}{w} x\right) \right\}^2} dx \quad (2)$$

$$I_x = \int_0^w \left[\frac{t_w^3}{12} + t_w \left\{ \frac{a_3}{2} \sin\left(\frac{\pi}{w} x\right) \right\}^2 \right] dx \quad (3)$$

플레이트 거더와는 달리 웹의 전단좌굴은 주름에 의해서 저항하므로 스티프너가 필요 없으며, 얇은 두께에도 비교적 큰 두께의 편평한 웹과 동일한 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 주름 웹은 주름 한 판에서 발생하는 국부좌굴, 여러 판에 걸쳐 나타나는 전체좌굴 및 이들의 연성좌굴에 대한 안정성이 확보되어야만 하며, EN 1993-1-5 D항에서는 전단좌굴에 대한 이상화된 전단좌굴응력을 식 (4)와 같이 정의하고 있다. 사인형 주름의 경우 Pasternak 등(2004)은 제형보다 형상이 더 매끈하기 때문에 안정성이 높다고 설명하면서 범위가 $a_3 \leq 40mm$ 와 $77.5mm \leq w \leq 155mm$ 에 대한 전체좌굴의 실험에 따른 이론식들을 소개하고 있다. 또한 Pasternak 등(2010)의 문헌에서 사인 주름의 경우 웹가 전단 항복 응력에 도달하기 전에는 국부좌굴이 일어나지 않는다고 언급했다.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad (4a)$$

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

여기서, $\tau_{cr,l}, \tau_{cr,g}$ 은 각각 국부좌굴 및 전체좌굴응력이며, D_x, D_y 는 각각의 축에 대한 휨강성이다.

2.1 플랜지의 모멘트 저항능력

Siokola(1999)와 Pasternak 등(2004)의 설계방안에 따라 모멘트와 전단력을 각각 플랜지와 웹에서 저항하게 설계하고자 할 때, 모멘트에 대한 플랜지의 기본적인 설계는 다음 식 (5)를 만족하여야 한다. 여기서 N_{Sd} 는 플랜지에 발생하는 부재력, N_{Rd} 는 설계응력이며, γ_M 은 부분계수이다.

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} (= N_{Rk} / \gamma_M) \quad (5a)$$

$$N_{Rk} = \min(N_{Z,Rk} : N_{D,Rk,l} : N_{D,Rk,g}) \quad (5b)$$

플랜지의 축력에 대한 계산은 인장이나 압축이냐에 따라 구분되며, 인장에 대한 플랜지의 설계저항능력은 다음과 같고, 여기서 f_y 는 강재의 항복응력이다.

$$N_{Z,Rk} = f_y \cdot b_f \cdot t_f \quad (6)$$

압축의 경우에는 좌굴에 관한 안정성 문제에 대해서 고려해야 하며, 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 검토가 필요하다. 우선 국부좌굴은 한계 판·폭두께비에 의한 검토이며, 파형으로 인해 감소된 플랜지의 유효폭을 적용하여 플랜지의 감소된 응력을 식 (7)과 같이 계산된다. 여기서, σ_1 은 압축응력값 가운데서 가장 큰 값이다.(DIN 18800 T.1 Tab.13)

$$N_{D,Rk,l} = \sigma_1 \cdot b_f \cdot t_f \quad (7)$$

플랜지의 전체좌굴은 압축플랜지 측면의 지지점 간격에 의해 영향을 받게 되며, 다음 식 (8)과 같이 정의된다.(Pasternak 등, 2004) 여기서, k_c 는 DIN 18800 T.1 Tab.8에 제시되어 있고, c 는 플랜지의 수평지지길이이다. 그러나 플랜지에 발생하는 하중이 최대하중을 넘지 않을 경우 검토는 생략된다.

$$N_{D,Rk,g} = \frac{0.5 \pi}{\sqrt{12}} \sqrt{E f_y} \frac{b_f t_f}{k_c c} \quad (8)$$

2.2 주름 웹의 전단저항능력

전단력에 대한 웹설계도 플랜지와 유사하게 식 (9)를 만족해야 하며, 계수 C 와 κ 는 EN 1993-1-5와 DAST-R015에서 제안하는 값이 다르다. 그러나 설계의 기본적인 개념은 동일하며, 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 제한세장비에 따라 감소계수 κ 가 결정된다.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} (= V_{Rk}/\gamma_M) \tag{9a}$$

$$V_{Rk} = C \cdot \kappa \cdot f_{y,w} \cdot h_w \cdot t_w \tag{9b}$$

EN 1993-1-5나 Pasternak 등(2004)은 C 값을 $1/\sqrt{3}$ 으로 정의하였고, DAST-R015는 0.35로 각각 정의되어 있다. 또한 감소계수도 좌굴 종류에 따라 다르게 제시하고 있으며, 전단력에 대해 저항하는 설계영역은 다소 차이가 난다.

DAST-R.015의 경우를 먼저 살펴보면, 세장비(λ_c)는 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 세장비 중에서 작은 값으로 감소계수가 결정된다. 특히 전체좌굴의 경우는 전체좌굴응력이 국부좌굴응력에 비해 0.5배 이상, 2배 미만일 때를 구분하고 있다.

$$\kappa = \frac{0.84}{\lambda_c} \leq 1.0 \tag{10a}$$

여기서,
 $\lambda_c = \min(\lambda_{c,l} : \lambda_{c,g}) \tag{10b}$

$$\lambda_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{cr,l}}} \tag{10c}$$

$$\lambda_{c,g} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2f_{y,w}}{\sqrt{3} \tau_{cr,g}}} & 0.5 \leq \frac{\tau_{cr,g}}{\tau_{cr,l}} \leq 2.0 \\ \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \tau_{cr,g}}} & \text{other} \end{cases} \tag{10d}$$

EN 1993-1-5의 경우에서도 다른 기준과 유사하지만 감소계수 식이 국부좌굴과 전체좌굴에 대해 다르게 제한하지만, 세장비는 동일한 식을 이용하고 있다.

$$\kappa_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leq 1.0 \tag{11a}$$

$$\kappa_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1.0 \tag{11b}$$

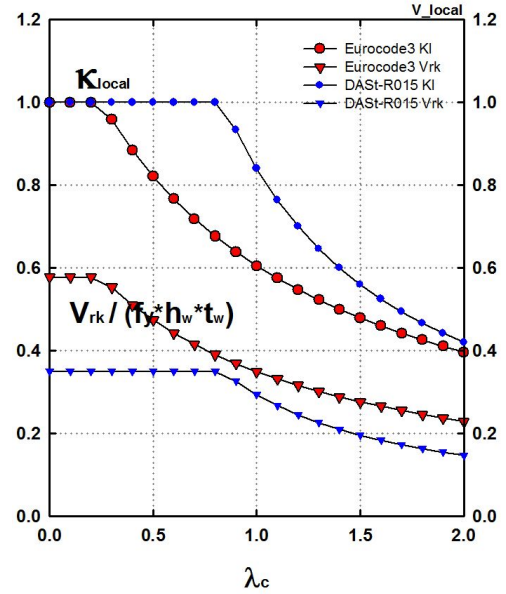
여기서,
 $\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \tau_{cr,l(g)}}} \tag{11c}$

Pasternak 등(2004)과 Siokola(1999)는 사인형 주름의 경우 국부좌굴은 고려되지 않고 전체좌굴에 대해서만 다음 식(12)으로 제시하고 있다.

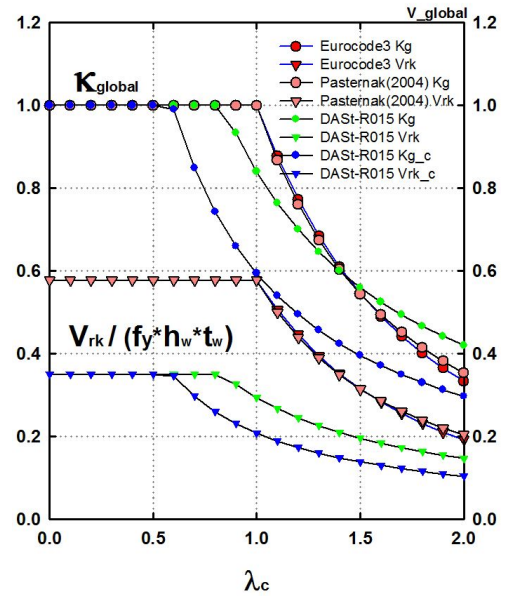
$$\kappa = \frac{1}{\lambda_c^{1.5}} \leq 1.0 \tag{12a}$$

여기서,

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3} \tau_{cr,g}}} \tag{12b}$$



(a) 국부좌굴



(b) 전체좌굴

그림 2. 세장비 λ_c 에 관한 감소율

이상의 전단좌굴에 대한 감소인자를 세장비에 따라 살펴보면 국부좌굴의 경우는 그림 2 (a), 전체좌굴의 경우는 그림 2 (b)와 같다. 그림에서 감소계수와 무차원 좌굴저항응력은 각각 원형과 삼각형으로 표시하였다. 국부좌굴의 경우, EN 1993-1-5의 전단좌굴저항능력은 DAST_R.015의 기준보다

감소계수의 영역이 낮음에도 불구하고 실질적으로 높게 평가되었음을 알 수 있다. 전체좌굴의 경우 국부좌굴과 유사하나 EN 1993-1-5는 Pasternak 등(2004)에서 제시된 곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2 (b)에서 DAST_R.015는 전체좌굴응력이 국부좌굴과 비교해 0.5배 이상 2배 이하의 모델(DAST_R.015 Vkr_c)에서는 설계저항능력이 더 불리한 조건으로 작용한다.

이 외에 다양한 조합응력 및 집중하중 에 대한 설계의 고려가 필요하며, 전단력과 모멘트 조합응력에 대한 제한은 주로 연속보 단부에서 전단력과 휨모멘트가 동시에 발생할 경우 하중능력이 감소되는 경우가 있다(Pasternak 등, 2004).

3. 최적구조설계와 실변수 유전자알고리즘

과거 최적화 문제의 어려움들은 수치해석기법과 컴퓨터의 발달로 인해 최적화 알고리즘의 개발이 용이하여졌다. 이 중 유전자 알고리즘은 설명하고 프로그래밍하기 간단하기 때문에 많은 문제에 적용되어 왔지만, 그 행동이 매우 복잡해질 우려가 있으며, 어떻게 동작 하는가 그리고 어떠한 종류의 문제에 가장 적합한 것인지에 관한 문제를 조명하는 것은 쉽지 않다. 그러나 고전적인 방법으로 해결하기 힘든 문제나 전역 최적화 문제에서는 매우 유용한 기법이다.(이말숙, 2006) 본 연구에서는 사인형 주름보의 최적설계문제를 형성하고, 실변수 유전자 알고리즘(Real-valued Genetic Algorithm)을 이용하여 최적화를 수행한다.

3.1 최적화 문제의 형성

구조물의 최적설계는 설계변수에 부과된 제약조건을 동시에 만족하면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수 조합을 수학적 표현에 의하여 구하는 방법을 말하며, 경제적인 설계를 위한 문제는 일반적으로 부재의 중량이 목적함수가 된다. 구조물의 중량을 목적함수 $F(\mathbf{x})$ 로 한 최적화 문제는 식 (13)과 같이 정의할 수 있으며, 제약조건식을 만족하는 최소중량의 설계변수를 탐색하는 것이 궁극적인 목적이다. 여기서, 모든 부재가 동일한 재료를 사용할 경우 목적함수식에서 나타나는 단위중량은 상수이므로 최소부피가 곧 최소중량을 의미하게 된다.

$$\text{minimize } F(\mathbf{x}) = \rho_i A(\mathbf{x})_i L_i \quad (13a)$$

$$\text{subject to } \begin{aligned} g_j(\mathbf{x}) &\leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \\ \mathbf{x}^{low} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{high} \end{aligned} \quad (13b)$$

여기서,

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

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

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

$g_j(\mathbf{x}), \mathbf{x}^{low}, \mathbf{x}^{high}$: 제약 함수와 설계변수의 상, 하한치

제약조건은 앞 절에서 설명되어진 바와 같이, 판-폭두께비 제약(g_1, g_2), 부재력 제약식(g_3, g_4) 및 처짐에 대한 제약(g_5)으로 식 (14)과 같이 구성된다. 판-폭두께비의 제약은 각각 DAST_R015의 EI.120, K115 및 EI.409 항목에 의한 제약으로 주름 웹보와 주름 웹 보의 플랜지에 대한 제약이다.(Pasternak 등, 2004; Siokola, 1999b)

$$g_1 = \frac{\lambda_p}{\lambda_{p, \max}} - 1.0 \leq 0 \quad (14a)$$

$$g_2 = \frac{\lambda_f}{\lambda_{f, \max}} - 1.0 \leq 0 \quad (14b)$$

$$g_3 = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} - 1.0 \leq 0 \quad (14c)$$

$$g_4 = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} - 1.0 \leq 0 \quad (14d)$$

$$g_5 = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\text{limit}}} - 1.0 \leq 0 \quad (14e)$$

$$\lambda_p = 0.8 \left(\frac{h_w}{t_w} \right) \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\kappa_{cr,l} E}} \quad (14f)$$

$$\lambda_{p, \max} = 0.316 \sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}} \quad (14g)$$

$$\lambda_f = \frac{b_f + a_3}{t_f} \quad (14h)$$

$$\lambda_{p, \max} = 1.03 \sqrt{\frac{E}{f_{y,w}}} \quad (14i)$$

3.2 실변수 유전자 알고리즘

최적화 문제의 해를 구하는 기법으로 실변수 유전자 알고리즘을 채택하며, 유전정보의 표현을 이진수가 아닌 실수로 구성하여 전역 해를 구한다. 유전자 알고리즘은 SA(Simulated Annealing)와 마찬가지로 다양한 유형의 문제에도 적용가능하며, 달리 방법이 없는 경우 사용되는 전역적 최적기법이다. 자연계에서 나타나는 유전과정을 모방하여 생물학적 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 지니는 설계변수집합의 선택(selection), 교차(crossover) 및 돌연변이(mutation)연산을 거쳐 다음 세대의 새로운 연산자를 인공적으로 만들어 내는 과정을 통해 적합한 해를 탐색한다. 따라서 국부탐색을 하면서 전체 최적(global optimum)을 찾기 위해 다수의 초기

점에 대해 반복계산을 하는 기존의 최적화 방법과는 달리 유전자 알고리즘은 하나의 설계점이 아닌 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 실시하므로 전체 최적점에 도달할 신뢰도가 큰 것으로 평가되고 있다. 여기서 소개되는 실변수 유전자 알고리즘은 이진변수를 이용한 유전자 알고리즘과 비교할 때 알고리즘은 같으나 설계변수가 이진수가 아닌 실수로 이루어지므로 이진화(Encoding)와 십진화(Decoding)과정이 필요 없고, 조작 및 종류와 방법에 있어서 다소 차이가 난다.

해를 탐색하는 과정에서 부모세대와 자식세대간의 유전연산은 적합도를 이용하여 형질을 유전시킨다. 유전자 알고리즘에서 적합도(fitness)란 생태계에서 살아남을 수 있는 능력의 척도로서, 교배지역(mating pool)에 개체들이 배치(복사)될 때 배치여부를 판정한다. 따라서 높은 적합도를 가지는 개체들은 다음 세대에 부모로 선택될 확률이 크다는 것을 의미한다. 본 연구에서 목적함수는 구조물의 중량이며 제약을 위반할 시 벌점함수 $P(\mathbf{x})$ 를 목적함수에 부가하도록 형성되어 있으므로 최소화문제(minimization problem)로 구현되기 위해서 적합도 함수 $\phi(\mathbf{x})$ 는 식 (15)과 같이 구성된다. 여기서, $g_i(\mathbf{x})$, $g_j(\mathbf{x})$ 는 제약함수이고, r_p , q 는 벌점함수의 증가계수 및 승수이며, 제약을 위반하였을 경우 벌점이 부과된다.

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{c_2}{c_1 + \{F(\mathbf{x}) + r_p P(\mathbf{x})\}} \quad (15a)$$

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \{g_i(\mathbf{x})\}^q + \sum_{j=1}^n \{g_j(\mathbf{x})\}^q \quad (15b)$$

자식세대($\mathbf{x}^{offspring}$)는 부모세대(\mathbf{x}^{parent})로부터 선택, 교차 및 돌연변이 등의 연산과정을 통해 형성되며, 각각의 연산 과정들은 수렴도를 높이거나 우수한 형질을 유지하는 등의 목적으로 연산을 수행한다. 특히 유전연산에서 확률변수들은 수리모형의 문제에 따라 효율적인 값이 다르게 적용되므로, 적절한 변수를 채택하는 것은 중요하다. 본 연구에서 채택되어진 교차, 돌연변이, 엘리트 보존전략(Elitist Strategy) 및 이계 교배(Out-breeding)에 대한 연산을 설명하면 다음과 같다.

이진변수의 교차는 부모세대의 염색체로부터 유전정보를 혼합하는 것으로 일점, 다점 및 균일교차 등이 있으나 실변수 유전자 알고리즘의 경우는 유전형질을 담고 있는 염색체의 형태로 변환하지 않기 때문에 교차방법이 다르며, 내삽(Interpolation)법, 외삽(Extrapolation)법, 휴리스틱(Heuristic)법 및 교차와 혼용한 휴리스틱법 등이 있다. 이중 내(외)삽 및 휴리스틱 방법은 식 (16)을 이용하여 자녀세대에게 혼합 전수시키는 방법이고, 여기서 r 은 난수(Random number)이다.

$$\mathbf{x}^{offspring} = \pm r \mathbf{x}_i^{parent} + (1 \mp r) \mathbf{x}_j^{parent} \quad (16a)$$

$$\mathbf{x}^{offspring} = \mathbf{x}_i^{parent} + r(\mathbf{x}_i^{parent} - \mathbf{x}_j^{parent}) \quad (16b)$$

돌연변이 연산은 교차조작과 마찬가지로 부모세대와는 전혀 다른 확률에 따라 자녀세대의 유전정보가 정의되는 것을 의미한다. 이진변수의 경우는 0과 1로 구성되므로 단순히 뒤바꾸면 되는 연산이지만 실변수 경우는 광범위한 설계공간의 탐색에 대한 새로운 탐색공간으로의 전위가 가능하도록 함으로써 국소 최적공간을 벗어날 수 있게 한다. 비교적 이진변수의 경우보다 높은 돌연변이 확률이 문제에 따라 다르게 적용되며, 식 (17)과 같이 정의된다.

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{low} + r(x_i^{high} - x_i^{low}), & \text{if } r \leq p_M \\ x_i^{current} & , \text{if } r > p_M \end{cases} \quad (17)$$

Kenneth De Jong(1975)에 의해 처음 소개된 엘리트 보존전략은 각 세대의 선택과정에서 가장 좋은 개체가 제외되거나, 교배 또는 변이에 의하여 가장 좋은 개체가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 이를 강제로 유지시키는 것이다. 엘리트 보존전략을 이용할 경우, 세대의 교체 과정에서 적합도가 향상됨에 따라 최적개체를 보존함으로써 모집단을 구성하는 최적개체의 적합도를 유지할 수 있다.(김종성 등, 2001)

마지막으로 이계 교배는 세대가 증가할수록 개체의 유전정보가 유사하거나 동일한 개체들이 발생하여 설계공간에 대한 탐색 효율이 저하되므로 이를 방지하기 위하여 매 세대마다 모집단에 속한 일부를 새로운 개체로 대체시켜 교배 즉, 이계 교배(Out-breeding)를 한다. 이계 교배 방법으로는 기존 개체에 미리 정의된 크기의 섭동(Perturbation)벡터 $d\mathbf{x}$ 와 난수벡터 \mathbf{r} 를 이용해 생성하며, 식 (18)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}^{new} = \mathbf{x}^{current} \pm \mathbf{r} \cdot d\mathbf{x} \quad (18)$$

섭동 벡터는 일반적으로 연산 초기에 결정 되므로 설계변수 공간의 크기에 따라 정의할 수 있으며, 해의 수렴도 및 정밀도에 영향을 미친다.(성활경, 2005)

3.3 최적설계 프로그램의 흐름도

본 연구에서는 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계를 위해서 실변수 유전자 알고리즘을 이용하여 최적프로그램을 구현하도록 하며, 앞서 설명된 유전연산을 구현하여 전역해를 탐색하도록 한다. 개발된 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다.

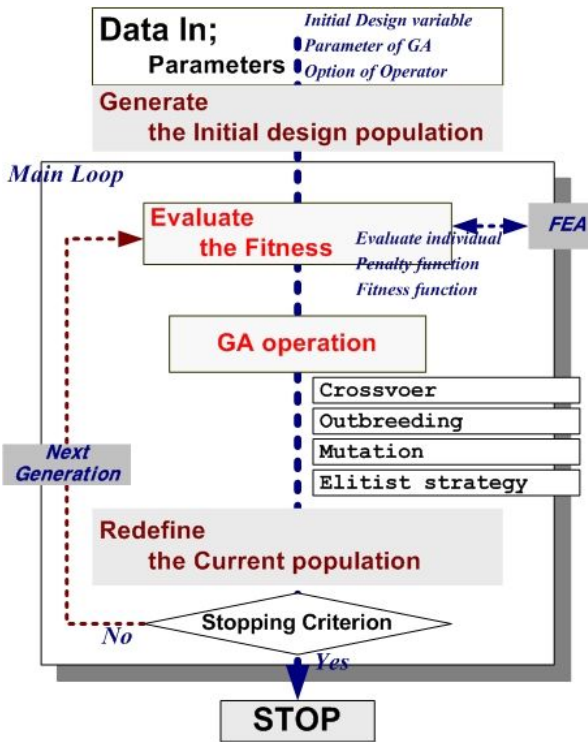


그림 3. 실변수 GA을 이용한 최적설계 프로그램 흐름도

4. 단순보 모델의 해석결과

사인형 주름 웹 보의 중량 최소화를 위한 목적함수와 단면 및 처짐에 관한 제약함수로 구성된 최적화 문제의 전역 최적점을 구하기 위해서 실변수 유전자 알고리즘을 적용하고, 그림 1과 같은 단순보 모델에 적용된 해석결과의 고찰을 통해 해석상의 확률 파라메타의 효율성과 해석결과의 유효성에 대해서 살펴본다.

실변수 유전자 알고리즘은 여러 가지 유전연산을 통해서 부모세대로부터 자식세대를 형성하며, 세대수가 증가할수록 적합도가 증가된 세대를 얻을 수 있다. 이 과정에서 나타나는 연산의 많은 부분은 난수의 발생과 발생된 난수가 유전 연산자에 대한 확률(Probability)에 의해 어떠한 연산을 수행할 것인지를 결정하는 것이다. 개발된 프로그램에서 채택된 연산자의 확률변수로는 교배확률(Crossover probability: p_C)과 돌연변이확률(Mutation probability: p_M)이 있다. 유전 연산자 중에서 돌연변이는 국소최적점으로부터 탈피해 전역해를 탐색하기 위한 방법으로 제시된 것으로서 부모세대와는 전혀 다른 염색체를 가지게 되는 것이다. 이와 목적이 비교적 유사하지만 이계교배의 경우는 자식세대의 형성에 있어서 부모세대에 섭동벡터를 통한 또 다른 부모세대를 형성하는 것으로서 부모세대에서의 유사한 형질 선택으로 인해 낮아진 설계공간

의 탐색 효율을 높이는 것이다. 즉, 설계공간의 확대를 위한 섭동벡터 공간의 크기는 탐색효율에 영향을 미친다. 따라서 본 절에서는 개발된 프로그램에서 사인형 주름 웹 보를 갖는 단순보의 최적설계에 있어서 단순보에 적용하였을 때 확률변수들과 섭동벡터의 변화에 따른 해의 수렴도와 효율성을 함께 살펴본다. 또한 부재의 항복강도와 하중의 증가에 따른 최적 결과의 변화와 제약함수의 변화를 통한 해석결과의 타당성을 함께 살펴본다.

적용될 단순보 예제는 스펠(L)이 10 m 이고, 등분포 하중 $w = 100 \text{ N/mm}$ 가 작용하며, 하중 종류에 대한 계수는 고려하지 않는다. 여기서 재료 탄성계수(E)와 포와송비(ν)는 각각 21000 kN/cm^2 및 0.3이다. 최적설계에서 주름의 형상은 $a_3 = 40 \text{ mm}$ 와 $w = 77.5 \text{ mm}$ 로 채택한다. 여기서 제시된 사인파형은 오스트리아 빈의 Zeman & CO사에서 개발되어진 자동생산기계를 통해서 제작되어지는 형상을 채택한 것이다.(Siokola 등, 1999; Siokola, 1999) 해석을 수행하기 위해서 채택되어진 설계변수의 상·하한치는 식 (19)와 같고, 보의 처짐에 대한 제약은 $\delta_{\text{limit}} = L/300$ 로 한다. 설계를 위한 부재력은 단순보이므로 최대 휨모멘트와 최대전단력을 이용하여 해석을 수행하며, 문제의 단순화를 위해서 부재의 자중과 사인형 웹의 연성효과에 대한 영향은 무시하였다.

$$10 \leq b_f(\text{or } h_w) \leq 3000 \tag{19a}$$

$$1 \leq t_f(\text{or } t_w) \leq 300 \tag{19b}$$

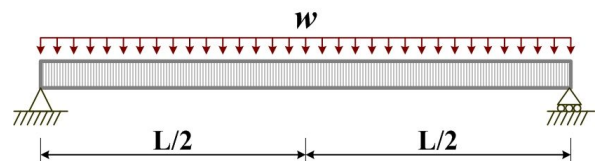
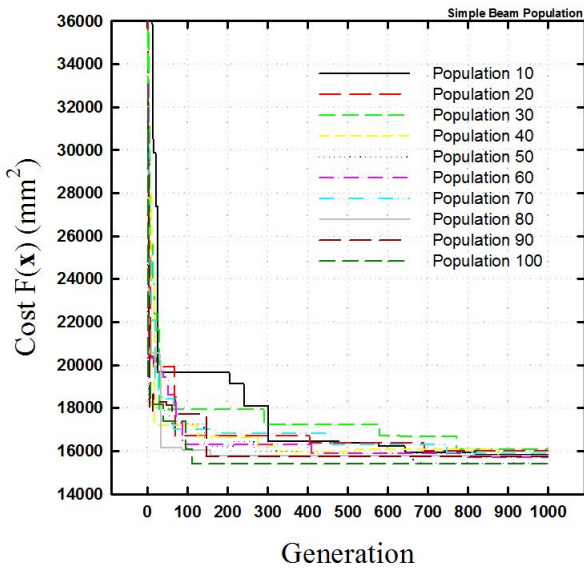


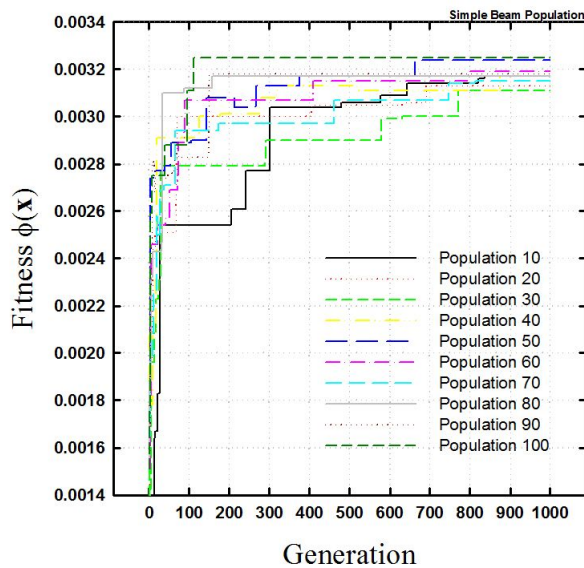
그림 4. 단순보 모델의 형상과 하중

4.1 세대수와 개체수의 증가에 따른 최적해의 수렴도

유전자 알고리즘은 일반적으로 개체수의 증가와 세대수의 증가에 따라 유전형질이 좋아진다. 그러나 확률적 연산을 기초로 하므로 매개변수의 약간의 변화에도 좋은 해를 얻을 수 있지만 연산을 많이 수행하여도 연산 량에 비례한 좋은 결과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 본 절에서는 단순보 예제에 대해서 세대수의 증가와 개체수의 증가에 따른 목적함수와 적합도의 변화를 살펴본다. 여기서, 개체(Population)수는 10에서 100까지 10씩 증가시키고, 세대(Generation)수는 모두 1000세대까지 해석하였다.



(a) 목적함수



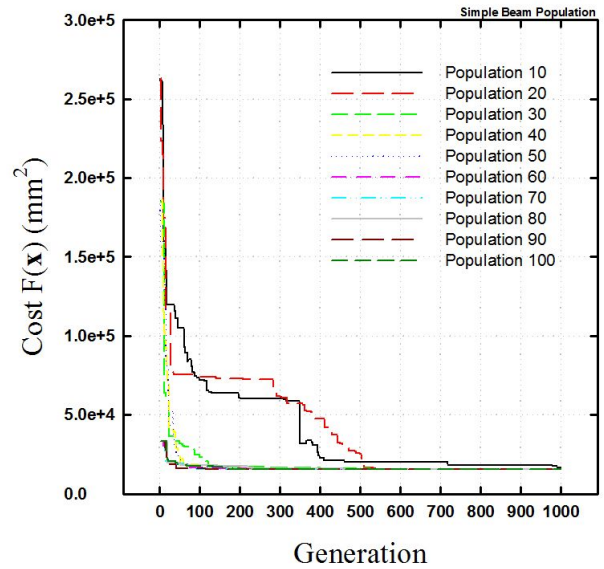
(b) 적합도

그림 4. 최적설계 해석결과 ($p_C = 0.875, p_M = 0.3, dx = 0.001x^d$)

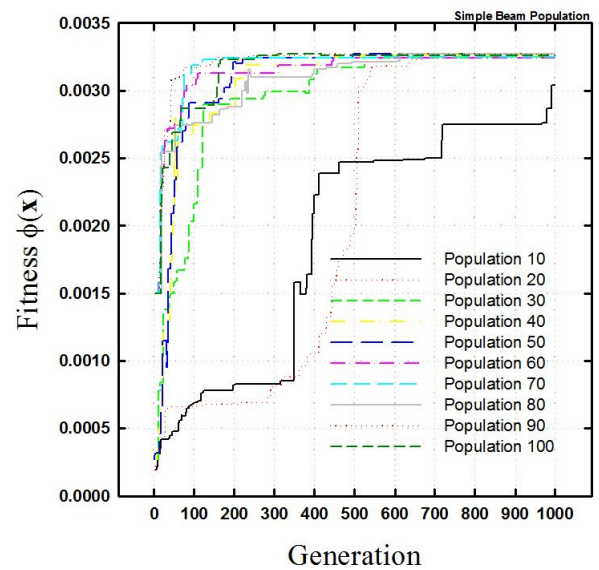
그림 4와 그림 5는 사인형 주름 웨브를 가진 단순보의 최적 설계 해석결과에 대해서 각 개체수 별 엘리트 개체에 대한 목적함수와 적합도의 변화를 나타내었다. 여기서 그림 4는 교배 확률 p_C 는 87.5%, 돌연변이확률 p_M 을 30% 및 이계교배의 섭동벡터는 전 설계공간 x^d 의 0.1%로 채택한 결과이고, 그림 5는 교배확률 p_C 는 25%, 및 섭동벡터를 설계공간의 30%로 채택한 결과이며 돌연변이 연산은 수행하지 않았다.

각 해석결과에 대한 수렴된 엘리트 객체의 설계변수와 벌칙함수의 값을 표 1과 표2에 각각 나타내었다. 여기서 벌칙함수

값이 0을 초과하지 않으므로 설계변수에 대한 목적함수는 제약조건을 위배하지 않는 유효한 영역에 있음을 알 수 있다. 두 결과에서 알 수 있듯이 세대수의 증가는 유사한 최적점으로 수렴하고 있으나 개체수가 적을수록 수렴속도는 나빠지게 됨을 그림 4와 5를 통해서 직관적으로 알 수 있다. 또한 개체수의 단순 증가에 따른 최종 수렴값은 적합도의 상승의 결과를 얻지는 못한다. 표 1과 2에서 볼 때, 최종적인 주름 웨브의 두께는 모두 4.5mm로 수렴하고 있으며, 다른 설계변수들은 다소 차이가 있다.



(a) 목적함수



(b) 적합도

그림 5. 최적설계 해석결과 ($p_C = 0.25, p_M = 0.0, dx = 0.3x^d$)

표 1. 최적설계 해석결과 ($p_C = 0.875$, $p_M = 0.3$, $d\mathbf{x} = 0.001\mathbf{x}^d$)

개체 수	$F(\mathbf{x})$ (mm ²)	$\phi(\mathbf{x})$	b_f (mm)	t_f (mm)	h_w (mm)	t_w (mm)	$P(\mathbf{x})$
10	15789.6	3.164×10^{-3}	217.7	15.0	1737.0	4.6	0.0
20	15980.3	3.129×10^{-3}	240.5	17.4	1359.5	4.9	0.0
30	16056.0	3.114×10^{-3}	324.1	13.2	1417.6	4.6	0.0
40	15785.8	3.167×10^{-3}	313.2	12.7	1516.4	4.5	0.0
50	15445.9	3.237×10^{-3}	185.7	20.4	1505.1	4.6	0.0
60	15680.6	3.189×10^{-3}	249.3	14.8	1579.9	4.6	0.0
70	15892.0	3.146×10^{-3}	207.6	17.4	1573.9	4.8	0.0
80	15767.4	3.171×10^{-3}	212.4	18.2	1514.3	4.6	0.0
90	15742.9	3.176×10^{-3}	292.9	13.2	1531.6	4.5	0.0
100	15383.7	3.237×10^{-3}	258.3	14.1	1577.3	4.5	0.0

표 2. 최적설계 해석결과 ($p_C = 0.25$, $p_M = 0.0$, $d\mathbf{x} = 0.3\mathbf{x}^d$)

개체 수	$F(\mathbf{x})$ (mm ²)	$\phi(\mathbf{x})$	b_f (mm)	t_f (mm)	h_w (mm)	t_w (mm)	$P(\mathbf{x})$
10	16458.1	3.038×10^{-3}	184.7	18.7	1676.7	5.0	0.0
20	15387.0	3.247×10^{-3}	240.7	16.3	1438.2	4.6	0.0
30	15403.6	3.246×10^{-3}	200.5	19.0	1499.7	4.5	0.0
40	15316.1	3.262×10^{-3}	237.3	14.9	1601.5	4.5	0.0
50	15279.4	3.270×10^{-3}	290.2	13.1	1490.3	4.5	0.0
60	15412.4	3.244×10^{-3}	229.7	16.2	1537.8	4.5	0.0
70	15403.7	3.246×10^{-3}	254.9	13.4	1666.5	4.5	0.0
80	15283.1	3.271×10^{-3}	203.6	18.1	1539.2	4.5	0.0
90	15295.9	3.268×10^{-3}	261.4	14.3	1516.5	4.5	0.0
100	15313.9	3.264×10^{-3}	246.0	15.3	1507.7	4.5	0.0

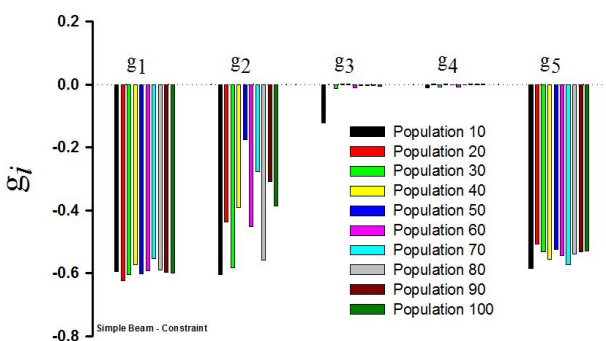


그림 6. 수렴된 개체의 제약함수 ($p_C = 0.25$, $p_M = 0.0$, $d\mathbf{x} = 0.3\mathbf{x}^d$)

세대수의 증가로 수렴된 엘리트 객체는 표 1와 2의 별점함수 $P(\mathbf{x})$ 값을 볼 때 설계가능영역에 있음을 알 수 있다. 그러나 각 설계변수에 대한 제약함수 값이 모두 허용하고 있는 범위를 최상으로 만족하는 것은 아니다. 그림 6은 그림 5에서 최종 수렴한 엘리트 객체의 설계변수에 대한 제약함수 값을 그래프로

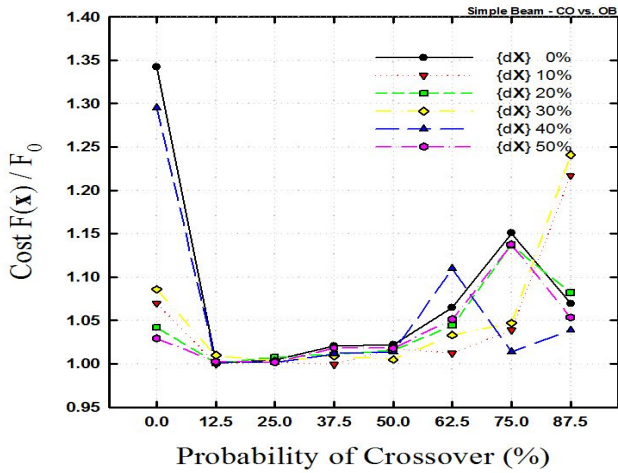
나타내었다. 여기서 제약함수 값은 주름진 웨브의 전단좌굴에 대한 제약(g_3)과 플랜지의 응력에 대한 제약(g_4)이 모두 경계점에 도달해 있음을 알 수 있다. 그리고 개체수의 증가에 따른 양상의 변화는 크게 없지만 가장 낮은 개체수의 해석의 경우 웨브의 전단응력에 대한 제약 g_3 의 경계에 도달하지는 못했고, 수렴된 엘리트 객체의 목적함수 결과도 가장 높음을 알 수 있다.

4.2 확률변수와 섭동벡터에 따른 해의 수렴도

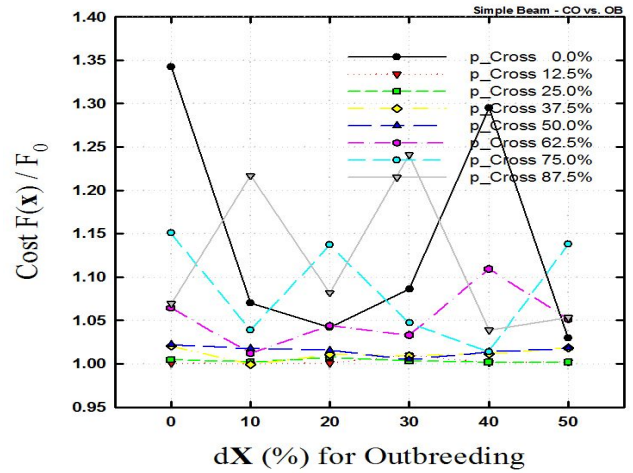
교배확률변수, 돌연변이확률변수 및 섭동벡터의 크기는 해의 수렴도와 전역탐색에 영향을 미친다. 각각의 파라메타는 발생하는 난수에 의해서 교배나 돌연변이연산을 수행하며, 돌연변이 연산이나 섭동벡터는 전역탐색을 위해서 또는 부모세대와의 형질의 유사성으로 인한 탐색효율을 높이는데 목적을 두고 있다. 그러나 최적의 파라메타 값은 형성된 문제에 따라 다르며, 변수의 단순 증가나 감소가 효율적이거나 유효한 탐색의 결과를 낳는 것은 아니다. 따라서 본 절에서는 유전 연산자 간의 파라메타에 따른 전역최적해의 결과를 비교하고, 3장에서 형성한 최적문제에 적합한 연산자와 파라메타 값에 대해 살펴본다. 여기서 해의 탐색을 위해서 100개의 개체를 100세대동안 해석을 수행하며, 세 연산자의 효율성을 살펴보기 위해서 각각 두 가지 연산만을 서로 적용한다.

그림 7은 돌연변이 연산을 제외한 결과이며, 그림 8은 각각 이계교배 및 교배의 연산을 제외하여 해석을 수행한 결과이다. 그림의 세로축은 목적함수를 $F_0 = 15260.7$ 로 무차원화 한 값이며, 돌연변이 연산을 수행하지 않은 모델의 해석결과 중에서 가장 좋은 엘리트 객체의 목적함수 값이다. 그림에서 볼 때에도 값의 단순한 증가나 감소에 대해서 수렴결과의 향상을 기대할 수는 없다. 그러나 그림 7의 돌연변이 연산을 수행하지 않은 해석결과를 보면 교배확률에 따라 수렴된 최적해의 안정 구간이 나타난다. 즉 교배확률이 12.5%에서 50%사이의 값은 비교적 안정된 최적해석결과를 보이고 있으며, 섭동벡터의 크기에 비교적 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 이계교배 연산을 수행하지 않은 그림 8 (a)의 결과에서는 비교적 일정한 양상은 보이지 않지만 돌연변이 확률이 20%에서 가장 작은 편차를 보이고 있다. 또한 그림 8 (b)의 교배연산을 수행하지 않은 결과에서 볼 때는 돌연변이 확률이 10%에서 가장 작은 편차와 높은 적합도의 개체로 수렴하였다. 이것은 이진변수 유전자 알고리즘에서 사용되는 일반적인 돌연변이 확률인 0.1~1%의 값보다 높게 나타난다(성활경, 2005).

그림 7의 결과에 대해 섭동벡터의 값이 20%와 30%일 때의 해를 살펴보면 그림 9,와 같다. 그림의 결과를 살펴볼 때, 교배확률이 25%와 37.5%일 때가 가장 빠르게 수렴한다.

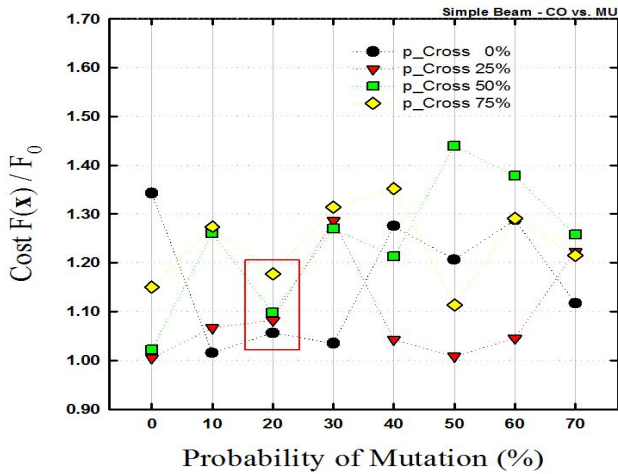


(a) 교배 확률에 따른 해석결과

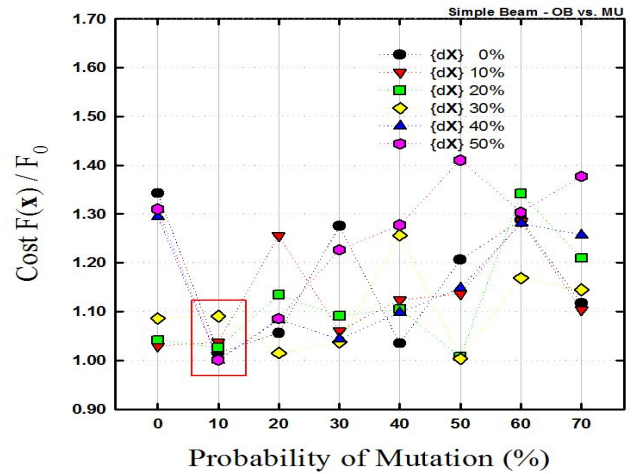


(b) 이계교배의 선택벡터에 따른 해석결과

그림 7. 교배 및 이계교배 연산에 따른 해석결과

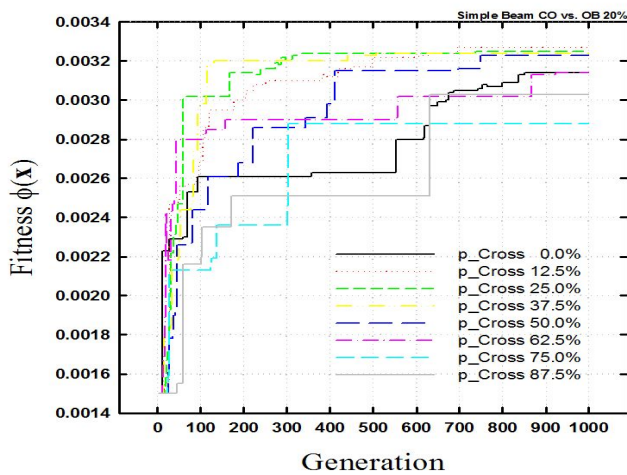


(a) 돌연변위 확률과 교배확률

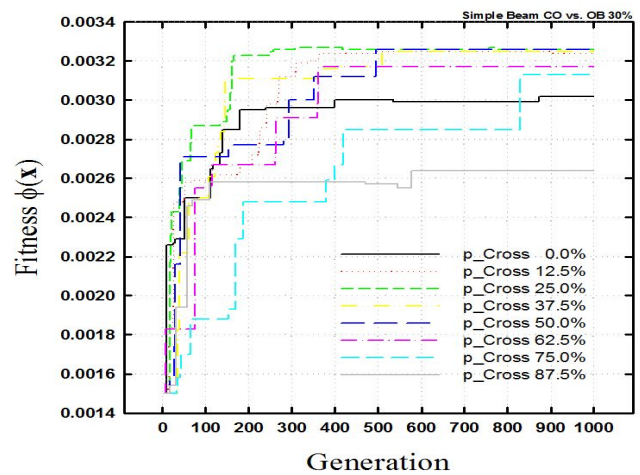


(b) 돌연변위 확률과 이계교배의 선택벡터

그림 8. 돌연변이확률의 변화에 따른 해석결과



(a) $p_M = 0.0, dx = 0.3x^d$ 의 해석결과



(b) $p_M = 0.0, dx = 0.3x^d$ 의 해석결과

그림 9. 최적설계 해석결과

4.3 하중과 항복강도에 따른 최적설계결과

사인형 주름 웨브 보의 최적설계 제약함수는 3장에 언급한 것과 같이 EN 1993-1-5, DASt-R015, Pasternak 등 (2004) 및 Siokola(1999)의 문헌을 바탕으로 정리되고 적용되었다. 이들 설계의 특성은 축방향 응력이 아코디언 효과로 인해 웨브에서는 전달되지 않으므로 축력과 모멘트는 플랜지가 전단력은 주름 웨브가 담당하도록 설계하는 것이다.(Pasternak 등,2010) 이것은 적용되어진 제약함수도 이와 같은 특성에 의해 형성되었음을 의미한다. 본 절에서는 이와 같은 설계특성을 하중의 증가와 항복강도의 변화에 대해서 어떠한 최적결과를 갖는지 알아본다. 여기서 해석에 적용되어진 항복응력 f_y 는 각각 240, 270, 330 N/mm²이다.

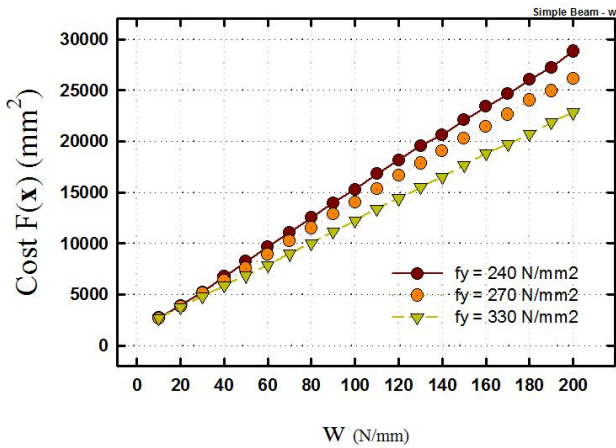
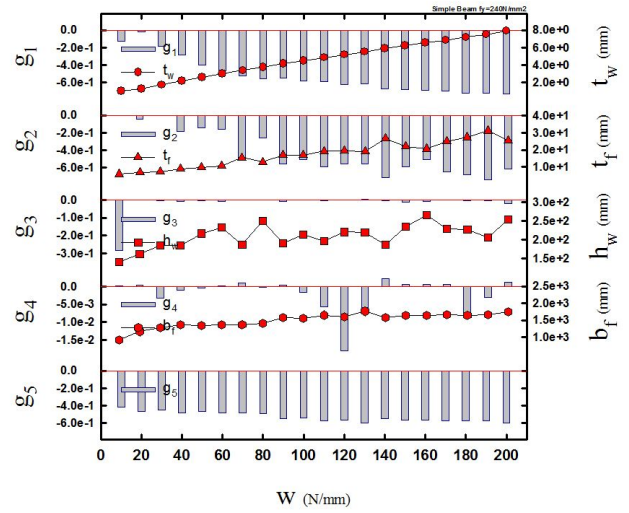


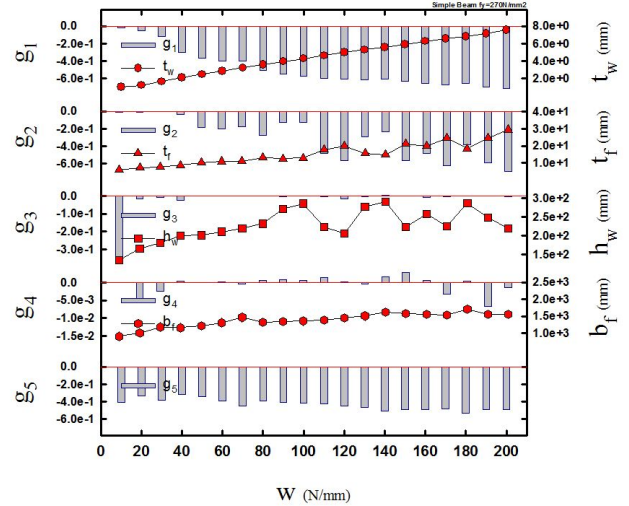
그림 10. 항복강도의 변화에 따른 목적함수의 변화

그림 10은 하중의 증가에 따른 최적설계의 변화결과를 나타낸 것이다. 그림에서 하중의 증가는 최적중량이 상승하였고, 항복응력의 증가는 최적중량이 낮아지는 결과를 보였다. 이것은 김종성 등(2001)의 논문에서 항복강도가 높아짐에 따른 최적결과가 낮아지는 것과 일치하는 결과이다.

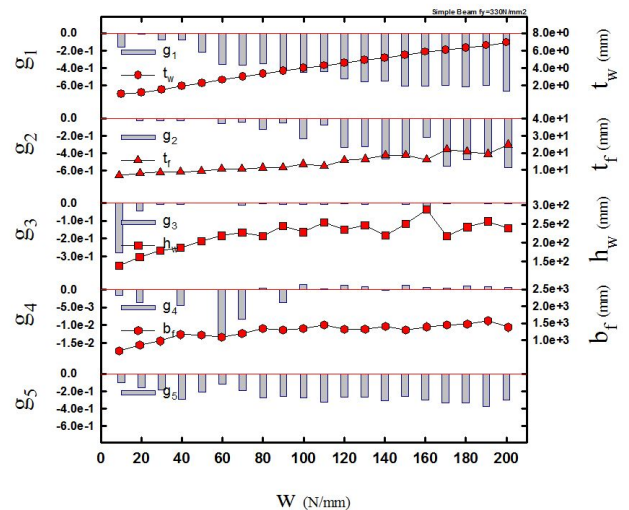
그림 10의 해석결과들에 대해서 설계변수 및 제약함수 값의 변화를 그림 11에 나타내었다. 그림에서 다각형으로 연결된 결과는 하중의 증가에 따른 최적설계결과와 설계변수의 변화 값이고, 막대그래프는 제약함수의 변화 값을 나타내었다. 여기서 제약함수 g_1 과 g_3 는 웨브에 관한 세장비 및 전단응력에 대한 제약이며, g_2 과 g_4 는 플랜지에 관한 세장비 및 응력에 관한 제약함수이므로 각각의 제약과 비교적 관계가 큰 설계변수들과 그래프를 중복시켜 나타내었다.



(a) $f_y = 240 \text{ N/mm}^2$



(b) $f_y = 270 \text{ N/mm}^2$



(c) $f_y = 330 \text{ N/mm}^2$

그림 11. 하중에 따른 설계변수 및 제약함수의 변화

그래프에서 하중의 증가에 따라 증가하는 설계변수는 t_w 이며, 제약함수 g_1 은 설계변수의 변화에 반응하여 계속 감소하였다. 그러나 h_w 의 증가와 감소에 대한 제약함수 g_3 의 변화도 유사한 반응을 보이지만 실질적으로 설계 가능한 경계점에 항상 도달하고 있는 결과이며, 그 이유는 제약조건의 값이 0에 거의 근접하고 있다. 이와는 달리 플랜지의 두께 t_f 는 t_w 변화와 같이 계속 증가하지는 않는다. 그러나 b_f 와 g_4 의 변화는 웹의 양상과 유사하게 설계 가능한 경계점에서 유지하고 있다. 이들의 변화는 f_y 의 모든 경우에서 조금의 차이는 있지만 양상이 비교적 동일하다. 이것은 설계변수 중에서 t_w 의 변화는 최적설계값에 능동적인 영향을 주고 있음을 의미한다. 또한 플랜지 두께 t_f 의 증가 감소가 교차하는 점은 h_w 곡선의 증가 감소의 교차점과 동일한 위치에서 나타난다. 이러한 변화는 f_y 가 240 N/mm²에서는 w 가 60 N/mm에서부터 나타나기 시작하며, 270 N/mm²은 100 N/mm에서, 330 N/mm²은 130 N/mm에서 두드러지게 나타난다. 이상의 결과로 볼 때, 응력제약에 대한 웹과 플랜지는 각각의 설계 경계점에서 두께에 관한 설계변수가 세장비에 따라 정의된다. 이것은 모멘트는 플랜지가 전단력은 웹이 저항하도록 하는 설계방법으로 나타나는 결과이다.

5. 결론

본 연구는 사인형 주름 웹을 갖는 보의 최적구조설계 방법을 제안하기 위해 중량을 목적함수로 최적화 문제를 형성하였고, EN 1993-1-5, DAST-R015 및 Pasternak 등 (2004)에서 제시하는 설계방법들과 전단좌굴응력의 설계식들을 비교, 고찰하여 제약함수를 구성하였다. 개발된 최적설계프로그램은 전역해 탐색기법을 적용하였으며, 등분포 하중을 받는 단순보 모델에 적용하여 확률변수와 연산방법에 따른 해의 수렴도와 효율성을 검토하였다. 또한 제약함수와 설계변수의 변화도 함께 고찰하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계를 위한 프로그램을 전역최적점을 탐색기법인 실변수 유전자 알고리즘을 이용하여 개발하였다. 채택된 연산자는 교배, 돌연변이, 이계교배 및 엘리트 보존전략이며, 본 연구에서 채택한 단순보 모델의 해석결과에서 최적해는 개체수와 세대수가 많을수록 비교적 조기에 수렴한다.
- (2) 실변수 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법은 교배확률, 돌연변이확률 및 선택벡터에 따라 수렴도를 향상시

킬 수 있고, 높은 형질의 엘리트 개체를 얻을 수 있다. 본 논문의 사인형 주름 웹 보의 최적설계에서 단순보 모델의 경우 교배확률이 12.5%에서 50%사이가 안정적인 해를 구할 수 있었으며, 선택벡터가 20, 30%에서는 교배확률이 각각 25, 37.5%가 가장 좋은 엘리트 개체를 구했다.

- (3) 개발된 사인형 주름 웹의 최적설계프로그램의 해석결과는 제약함수와 설계변수의 변화 결과를 통해 볼 때, 제안된 설계방법을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 등분포 하중을 받는 단순보 모델에서 항복강도의 증가는 최적단면이 감소하는 결과를 얻었으며, 플랜지와 웹은 각각의 응력제약에 대한 설계가능공간의 경계영역에서 세장비를 만족하는 단면두께를 선택하고 있다.

제형 주름은 복부 파형강판 박스거더에 많이 적용되므로 국내에서도 비교적 많은 연구가 수행되었다. 그러나 사인형 주름 웹을 갖는 보의 연구는 비교적 적은 편이며, 설계규준 또한 미비하다. 본 연구를 통해 사인형 주름 웹을 갖는 보의 강구조물 적용에 대한 구조설계와 최적화 방안에 대한 기초 연구를 제공하는데 의미가 있다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(#06 R&D B03) 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥 프로그램의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

김성남, 전진수, 느규엔 반 반, 강영종(2008) 파형 복부판을 갖는 I형 거더의 비틀림 거동 연구, 2008년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp.407-410.

김종성, 손수덕(2001) 박공형 철골건물의 GA와 동적계획법을 이용한 최적설계에 관한 연구, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제17권, 제11호, pp.51-58.

뉴웬 녹 용, 김성남, 강영종(2010) 순수휨을 받는 사인 파형 복부판 I형 거더의 횡-비틀림 좌굴 강도, 2010년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp.77-78.

성활경(2005) 최적설계, 도서출판 골드.

이말숙, 윤영목, 손수덕(2006) 개선소성형지해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 퍼지최적설계, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp.147-160.

이재민, 김성남, 한금호, 강영종(2009) 파형 복부판 I형 거더의 비틀림 거동에 대한 해석적 연구, 2009년도 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp.119-120.

- Abbas, H.H., Sause, R., and Driver, R. (2002) Shear Strength and Stability of High Performance Steel Corrugated Web Girders, *Proc, Structural Stability Research Council*, pp.361-387.
- Abbas, H.H. (2003) *Analysis and Design of Corrugated Web I-girders for Bridges using High Performance Steel*, PhD dissertation, Lehigh University, Bethlehem, PA.
- 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, pp.1391-1406.
- Driver, R., Abbas, H.H., and Sause, R. (2006) Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp.195-203.
- Easley, J.T. and McFarland, D.E. (1969) Buckling of Light-gage Corrugated Metal Shear Diaphragms, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST7, pp.1497-1516.
- Elgaaly, M. and Dagher, H. (1990) Beams and Girders with Corrugated Webs, Proceedings, SSRC Annual Technical Session, Bethlehem, PA, pp.37-53.
- EN 1993-1-5 (1993) *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5 Plated structural elements*.
- Pasternak, H. and Kubieniec, G. (2010) Plate girders with corrugated webs, *Journal of civil engineering and management*, No. 16(2) pp.166-171.
- Li, Y., Zhang, W., Zhou, Q., Qi, X., and Widera, G.E.O. (2000) Buckling Strength Analysis of the Web of a WCW H-beam: Part2. Development and Research on H-beams with Wholly Corrugated Webs(WCW), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp.115-118.
- 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, pp.1198-1205.
- Siokola, W. and Poster, H. (1999) Fabrication Tools for Corrugated Web I-beams, *Modern Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, pp.42-45.
- 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 pp.119-123.
- DAST-Richtlinie 015 (1990) Träger mit schlanken Stegen, Stahlbau-V., German.
- DIN 18800 (1990) *Stahlbauten Teil 1-3*, German.
- Pasternak, H. and Hannebauer (2004) *4. Träger mit profilierten Stegen*, Stahlbau Kalender 2004, Ernst & Shon, German, pp.449-492.
- Siokola, W. (1999) *Wellstegträger Technische Dokumentation*, 2. Auflage, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Wien.

(접수일자 : 2011. 4. 15 / 심사일 2011. 4. 19 /
심사완료일 2011. 10. 5)