

사인형 주름웹보의 이산화 최적구조설계

손수덕¹⁾ · 유미나²⁾ · 이승재^{3)*}

¹⁾ 연구교수, 한국기술교육대학교, 건축공학부 ²⁾ 석사과정, 한국기술교육대학교 대학원, 건축공학과 ³⁾ 교수, 한국기술교육대학교, 건축공학부

Discrete Optimum Design of Sinusoidal Corrugated Web Girder

Shon, Su Deok¹⁾ Yoo, Mi Na²⁾ Lee, Seung Jae^{3)*}

¹⁾ Research Professor, School of Architectural Eng., Korea University of Technology and Education, Cheonan, 330-708, Korea

²⁾ Master's Course, School of Architectural Eng., Korea University of Technology and Education, Cheonan, 330-708, Korea

³⁾ Professor, School of Architectural Eng., Korea University of Technology and Education, Cheonan, 330-708, Korea

ABSTRACT : The use of sinusoidal corrugated web girder for the box-type girders and gable steel main frames has recently been increasing very much. The reasons are that the thin web of the girder affords a significant weight reduction compared with rolled beam and welded built-up girder, and that corrugation prevents the buckling failure of the web. Improvements of the automatic fabrication process makes mass production of the corrugated web and unit possible, and applications of this girder have been extended considerably. Thus, the research for the optimum design processer considering the production data is needed practically. For doing this research, we develop the discrete optimum structural design program in consideration of production list data for the research, and the program apply to the single girder under the uniform load and the concentrated load as numerical example. We consider objective function as minimum weight of the girder, and use slenderness ratio, stress of flanges and corrugated web, and the girder deflection as the constraint functions. And also the Genetic Algorithms is adopted to search the global minimum point by using the production list as a discrete design variable. Finally, to verify the optimality of the design, we conduct a comparison of the results of the discrete optimum design with those of the continuous one, and also analyze the characteristics of the optimum cross-section.

KEYWORDS : discrete optimization, corrugated web girder, sinusoidal corrugation, genetic algorithms, discrete design variable

1. 서 론

전단좌굴능력이 평판에 비해 우수한 주름진 판은 항공기를 비롯한 다양한 산업용 구조물에 많이 적용되어 왔으며, 현재 도 주름웹(Corrugated web)을 이용한 보 등이 교량이나 강구조물에 적용되고 있다. 주름웹은 1829년 Palmer사의

특히로 시작된 이래 1960년대 스웨덴에서는 일반적인 강구조물에 적용되기 시작하였고, 유럽에서의 활발한 기술 적용은 주름웹을 가진 보(이하, 주름웹보: Corrugated web girder)의 구조설계법 및 관련 기준에 대한 다양한 연구가 수행 되었다. 특히, 마름모형(Trapezoidal)이나 사인(Sinusoidal)형으로 가장 많이 설계되었던 주름웹은 스티프너로 보강된 플레이트 거더의 웹에 비해 박판으로 설계될 수 있었기 때문에 제작의 어려움에도 불구하고 경제적인 장점을 가지게 되었다. 주름웹의 전단좌굴특성은 평판과는 달리 웹 높이뿐 아니라 파형에 영향을 받게 되며, 국부좌굴, 전체 좌굴 및 연성좌굴로 구분되는 매우 복잡한 좌굴현상이 나타난다. 이러한 까닭에 주름진 웹에 대한 연구는 주로 전단좌굴거동과 안정성, 주름웹보의 휨에 대한 탄성 횡좌굴 그리

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 7, 2012; revised November 1, 2012; approved on December 12, 2012. © KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-041-560-1334; Fax. +82-041-560-1224
E-mail: leeseung@koreatech.ac.kr

고 피로하중에 대한 거동과 피로수명의 개선에 대한 실험적 및 해석적 연구가 많이 수행되었다^{(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10),(11),(12),(13)}. 최근, 주름웹보는 주름을 가공하는 설비기구와 자동용접과정을 통하여 생산성을 높일 수 있게 되었으며, 양질의 규격화된 제품을 생산할 수 있게 되었다^{(14),(15),(16)}.

박판으로 인한 재료의 절감에도 불구하고 제작상의 어려움은 경제적 측면에서 극복해야만 하는 문제가 되었고, 자동용접과 생산시스템을 이용한 규격화된 제품과 최적설계연구들이 필요하게 되었다. 주름웹보를 가진 부재들의 최적화 연구는 Zhang⁽¹⁷⁾의 열간 압연 WCW(Wholly Corrugated Web) H-형강 보의 압축좌굴에 대한 최적 단면의 연구와 손수덕 등⁽¹⁸⁾의 전단 좌굴을 고려한 주름웹 보의 최적설계 등이 수행되었다. 그러나 압축좌굴로서의 효율적인 단면만을 연구하였을 뿐 전단좌굴은 고려되지 않았고, 부재의 범위도 열간압연 생산이 가능한 범위로 한정되어 있다⁽¹⁹⁾. 유럽의 설계 기준을 이용한 손수덕⁽¹⁸⁾의 최적설계도 설계변수를 주름웹보의 두께와 높이 및 플랜지의 폭과 두께의 연속된 변수로 사용하기 때문에 이상적인 최적단면은 얻을 수 있지만, 규격화된 단면을 고려하는 것은 어렵다.

따라서 본 연구에서는 주름웹보의 규격화된 생산부재 데이터를 고려하여 최적설계프로그램을 개발하도록 한다. 기존의 연구에서 이용된 연속변수로 구성된 최적설계에 대해서 이산변수를 이용하여 부재단면을 고려하도록 한다. 일반적으로 이산변수에 적용되는 이진변수 유전자 알고리즘은 십진수와 이진수 사이의 변환이 필요하므로 실변수 유전자 알고리즘을 이산변수에 적용하도록 하며, 정수형 변수를 기반으로 알고리즘을 프로그래밍 한다. 단면의 형상에 대한 설계변수 또한 규격화된 단면의 생산번호를 이용하여 최적해를 탐색하며, 이것은 단면형상의 설계변수 군을 하나의 설계변수로 치환할 수 있으므로 보다 효율적인 해석을 할 수 있다. 여기서 최적구조설계를 위한 수리모형은 중량최적화를 목적함수로 하며, 단순보 예제에 적용하여 해의 유용성 및 신뢰성과 최적 단면의 특성도 함께 비교 고찰한다. 논문의 구성은 1장에서 연구의 목적과 배경을, 2장에서는 이산 데이터를 이용한 유전자 알고리즘의 정수형 유전정보와 이산화 프로그램을 설명한다. 3장에서는 최소중량설계를 위한 수리모형과 제약조건에 대해서 기술하고, 4장에서 해석대상예제를 이용하여 최적 단면의 특성과 연속변수 및 이산변수의 해석결과를 비교 고찰하며, 5장에서 연구결과에 대한 결론을 제시하도록 한다.

2. 이산 데이터 유전정보와 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 전역 최적해 탐색기법으로 유전과정을

모방하여 모델링한 설계변수집합을 통해 적합한 해를 탐색한다. 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 하므로 전역최적해에 도달할 신뢰도가 큰 것으로 평가되며, 이산 데이터를 이용한 적용에도 매우 용이하다. 일반적으로 사용되는 이산데이터의 경우 이진변수 유전자알고리즘을 이용하는 경우가 있으나 실수변수 유전자 기법을 바탕으로 정수형 변수로 치환하여 이용하면 보다 간편하게 다룰 수 있다.

2.1 유전자 알고리즘과 유전정보의 자료형식

일반적으로 많이 알려진 유전자 알고리즘의 유전정보는 이진비트(binary bit)로 이루어진 이진코드(binary string)들이며, 이진코드들이 한데 모여 하나의 모집단(population)을 이룬다. 그리고 기본적 연산의 탐색과정을 통해 현 세대의 개체들보다 더 높은 적합도를 가지는 개체들로 갱신되어져 다음 세대(generation)를 구성하여 진화한다^{(20),(21)}. 그러나 설계 변수는 십진수의 실수로 표현되며 일차원 스트링으로 표현되는 유전정보는 적합도(fitness)함수와 의 정보를 위해서 이진화(encoding)과정과 십진화(decoding)과정을 필요하게 된다.

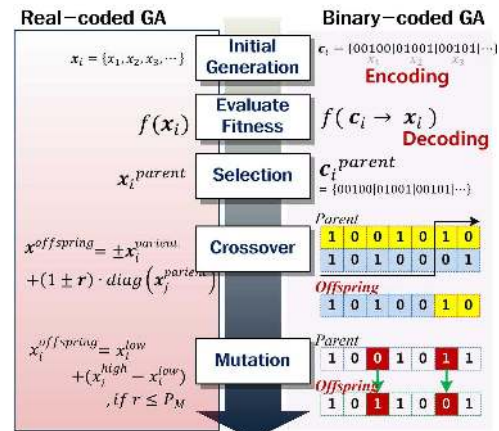


Fig.1 Comparison of the Operators in Real and Binary Coded Genetic Algorithms

이과정은 유전정보를 십진수로 표현하면 불필요한 과정이 되며, 실질적인 공학문제에 접근하기가 보다 용이하다. 이진변수(binary coded) 유전자 알고리즘과 실수변수(real coded) 유전자 알고리즘은 Fig. 1에서 보는바와 같이 유전정보의 표현이 다르며, 이진수로 표현되는 개체 c_i 는 십진수로 변환하면 x_i 와 같이 나타낼 수 있다. 적합도를 계산하는 과정에서 이진변수는 반드시 십진수로 변환해야 하는데 십진수로 표현된 유전자 알고리즘은 이 과정이 생략되며, 유전자 연산의 조작과정도 다르다. 교배연산의 이진변수에서 교배(Crossover)연산의 경우 일점교배 또는 다점교배 등의 지정된 염색

체 배열이 뒤바뀌게 되는 과정이지만 십진변수는 식 (1)과 같이 내삽(Interpolation)법, 외삽(Extrapolation)법, 휴리스틱(Heuristic)법 및 교차와 혼용한 휴리스틱법 등으로 설계변수들로 구성된 개체가 다른 개체의 설계변수로 섞여서 교배된다. 돌연변이 연산에서도 이진변수는 그림에서 보는 바와 같이 하나의 비트 혹은 몇 개의 비트들이 바뀌는 반면 실수변수 경우는 식 (2)와 같이 광범위한 설계공간의 탐색에 대한 새로운 탐색공간으로의 전위가 가능하도록 함으로써 국소 최적공간을 벗어날 수 있게 한다^[18].

$$offspring = \pm r \cdot parent + (1 \mp r) \cdot parent \quad (1)$$

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{low} + r(x_i^{high} - x_i^{low}), & \text{if } r \leq p_M \\ x_i^{current} & , \text{if } r > p_M \end{cases} \quad (2)$$

여기서 r 은 난수(Random number)이고, p_M 은 돌연변이에 대한 확률변수이다. 유전정보의 두 자료형식 모두 해를 탐색하는 과정에서 부모세대($parent$)와 자식세대($offspring$)간의 유전연산은 적합도에 따라 형질을 유전시키며, 교배지역(mating pool)에 개체들이 배치(복사)될 때 배치여부를 판정한다. 또한 교배나 돌연변이와 같은 유전연산은 각각의 확률변수(Probability)에 의해 결정되어진다.

2.2 이산 데이터를 이용한 유전정보와 프로그래밍

산화 최적설계는 설계변수가 연속된 값이 아닌 불연속 값을 이용하는 것으로서 변수가 실수가 아닌 정수형으로 표현되어야 하거나 유한한 개수의 집합으로 구성된 불연속 데이터를 이용하고자 할 때 적용하는 방법이다. 이진변수 유전자 알고리즘의 경우 표현하고자 하는 유전정보의 데이터가 얼마나 되는가에 따라 결정된다. 김종성^[22]은 128개의 원형강관 단면 데이터를 표현하기 위해서 7비트의 염색체를 이용했다. 이것은 2진수로 표현하였을 때 데이터를 유전정보로 표현할 수 있는 최소 비트수에 해당된다. 이와 같이 염색체의 설계변수와 데이터의 범위에 따라서 비트수를 결정하고 세대를 형성한다. 그러나 실수변수 유전자 알고리즘은 유전정보가 십진수로 표현되며 설계변수영역은 상하안치의 경계조건으로 표현 되므로 형의 선언을 정수형으로 처리함으로써 간단하게 유전정보를 처리할 수 있다.

실변수 유전자 알고리즘을 이용한 연속최적설계의 자료구조는 설계변수가 모두 실수형 변수로 선언되어 사용되며, 경계조건에 따라서 확률변수의 범위가 결정된다. 정수형 변수로 치환하여 사용할 경우 이산변수를 표현하는 것은 정수형 변

수로 선언할 뿐만 아니라 각 이산데이터에서 표현하고 있는 설계변수의 성분 값을 불러올 수 있는 저장 공간과 연결되어 있어야 한다. 또한 확률변수에 의해서 결정된 변수값은 여전히 실수형 변수로 나타나므로 이에 대한 정수형 값으로 치환하는 과정이 필요하다. 따라서 연속최적설계에 대한 유전자 알고리즘의 프로그램에서는 해를 탐색하는 전체 메커니즘의 변화는 없으나, 데이터 자료형의 변환과정, 여러 설계변수가 하나의 이산데이터로 축약되는 과정 및 이산데이터의 저장과정이 추가된다.

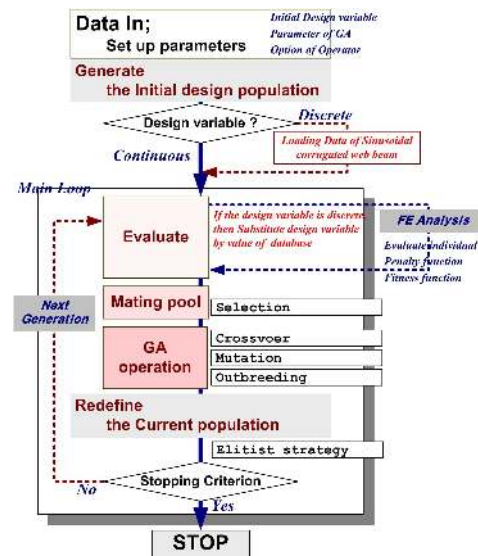


Fig. 2 Flowchart of Optimum Design Program Using Discrete Genetic Algorithms

이상의 과정을 주름웹브의 최적구조설계를 위해서 프로그램으로 구현하였으며, Fig. 2와 같이 유전자 알고리즘의 흐름도로 나타낼 수 있다. 그림에서 생산부재를 고려한 이산 데이터는 초기세대를 구성하기 이전에 저장 공간에 기록된 데이터와 연계하여 정수변수로 나타내었으며, 부재의 종류가 단 순번호와 같이 단일한 경우는 하나의 정수로 표현할 수 있다. 본 연구에서 사용한 유전 연산은 선택, 교배, 돌연변이 이계 교배(Out-breeding) 및 엘리트 보존전략(Elitist Strategy) 연산자를 이용하도록 한다.

3. 주름웹브의 최적구조설계

유럽에서는 주름웹브를 DAST-R015, DIN 18800 또는 EN 1993-1-5 D항의 기준을 이용해서 설계할 수 있으며^{[23], [24], [25]}, 주로 휨은 플랜지, 전단력은 웹에서 분담하여 설계하는 것이 일반적이다. 주름의 형태에 따라 전단좌굴응력이 달리 표현되지만 손쉽게 제형주름에 등가한 파라메타를

사인형에 적용하기도 한다. 본 논문에서는 주름 형태와 크기에 대해서는 사인형 주름의 규격화된 제품을 이용하기로 한다^[26].

3.1 최적화문제의 형성

사인형 주름웹브의 최소중량설계를 위한 최적화 수리모형을 식 (3)과 같이 구현하도록 한다. 구조물의 중량을 목적함수로 한 아래 식의 최적화 문제는 제약조건을 만족하는 최적단면을 구하는 것이 궁극적인 목적이며, 이산 데이터를 이용하여 정의된 설계변수로 목적함수가 구성된다.

$$\text{minimize } F(\bullet) = \rho_i A(\bullet)_i L_i \quad (3a)$$

$$\text{subject to } g_j(\bullet) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3b)$$

여기서,

$$\bullet = \{k\} = \{b_f^k, t_f^k, h_w^k, t_w^k\}^T : \text{설계변수벡터}$$

k : 이산화 데이터 부재번호

$\rho_i, A(\bullet)_i, L_i$: i 부재의 단위중량, 단면적, 길이

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

$g_j(\bullet)$: 제약 함수비트

이산데이터를 통해 나타나는 위 식의 이산화 설계변수는 생산부재 데이터의 부재번호를 이용하여 Fig. 3과 같은 부재형상정보인 파고($a_3/2$), 파장(w, s) 그리고 웹의 두께(t_w)를 불러올 수 있게 된다. 또한 한 파장에 대한 길이(s) 및 주름진 웹의 단면이차모멘트(I_x)는 저장된 데이터로부터 불러온 형상변수를 이용하여 계산할 수 있다.

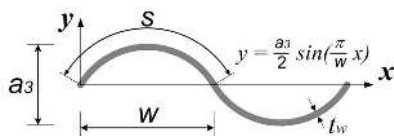


Fig. 3 Sinusoidal Corrugation and Shape Parameter

제약조건은 손수덕 등^[18]의 문헌에서 소개된 제약조건을 적용하고, 판-폭두께비 제약(g_1, g_2), 부재력 제약식(g_3, g_4) 및 처짐에 대한 제약(g_5)으로 다음과 같이 구성된다.

$$g_{1(\text{or } 2)} = \frac{\lambda_{p(\text{or } f)}}{\lambda_{p(\text{or } f), \text{max}}} - 1.0 \leq 0 \quad (4a)$$

$$g_{3(\text{or } 4)} = \frac{V_{Sd}(\text{or } N_{Sd})}{V_{Rd}(\text{or } N_{Rd})} - 1.0 \leq 0 \quad (4b)$$

$$g_5 = \frac{\delta_{\text{max}}}{\delta_{\text{limit}}} - 1.0 \leq 0 \quad (4c)$$

$$\text{여기서, } \lambda_p = 0.8 \left(\frac{h_w}{t_w} \right) \sqrt{\frac{f_y}{\kappa_{cr,l} E}}$$

$$\lambda_{p, \text{max}} = 0.316 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

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

3.2 사인형 주름웹브의 전단설계기준

사인형 주름의 전단응력을 계산할 경우 제형의 전단좌굴응력 계산에 사용되는 파라메타를 이용하여 평가하였으나 주름의 매끄러운 형상으로 인해 전단성능이 월등함을 알게 되었다. 특히, $a_3 \leq 40\text{mm}$ 와 $77.5\text{mm} \leq w \leq 155\text{mm}$ 의 범위에 대한 사인형 주름의 연구가 많이 진행되었고, 이상화된 전단좌굴응력은 식 (5)와 같다.

$$\tau_{cr,l} = \left(5.34 + \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad (5a)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_y^3} \quad (5b)$$

여기서, $\tau_{cr,l}, \tau_{cr,g}$ 은 각각 국부좌굴 및 전체좌굴응력이며, D_x, D_y 는 각각의 축에 대한 휨강성이다. 전단력에 대한 식 (4)의 제약조건 g_3 에서의 설계는 식 (6)을 만족하는 조건이며, 식 (5)의 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 전단좌굴응력에 해당되는 감소계수 κ 가 결정된다.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} (= V_{Rk}/\gamma_M) \quad (6a)$$

$$V_{Rk} = C \cdot \kappa \cdot f_{y,w} \cdot h_w \cdot t_w \quad (6b)$$

본 연구에서는 사인형 주름웹브의 최적설계에 사용될 설계기준을 EN 1993-1-5를 채택하기로 하며, C 값은 0.58로 적용된다. 식 (6)의 감소계수 κ 는 식 (7)와 같이 정의되며, 전단좌굴응력과 좌굴특성에 따라서 결정된다.

$$\kappa_l = \frac{1.15}{0.9 + \lambda_{c,l}} \leq 1.0 \quad (7a)$$

$$\kappa_g = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (7b)$$

여기서,

$$\lambda_{c,l(g)} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_{\sigma,l(g)}}}$$

3.3 규격화된 사인형 주름웹보의 이산 데이터

이산화 최적설계를 위해서 적용될 사인파형 주름의 형상과 주름웹보의 규격은 오스트리아의 Zeman & CO사의 자동 생산기계에서 제작되는 데이터를 채택하도록 한다^{[14],[26]}. 제시되는 주름 형상은 $w = 77.5 \text{ mm}$ 와 $a_3 = 40 \text{ mm}$ 로 식 (5)의 전단좌굴응력에 대한 형상의 범위에 포함되는 사인형 주름이다. 이산데이터는 모두 396개이며, 이진변수로 표현할 경우 9개의 비트를 필요로 하지만 정수변수로 구성할 경우 부재번호에 대한 상하안치의 조건만 필요할 뿐이다. 규격화된 생산제품은 웹의 두께 t_w 의 2, 2.5, 3mm 3가지 종류의 조합과, 플랜지의 두께 t_f 의 10, 12, 15, 20, 25, 30mm 6가지 종류의 조합으로 구성된다. 웹의 높이 h_w 와 플랜지의 폭 b_f 도 각각 500, 625, 750, 1,000, 1,250, 1,500mm의 6종류 및 200, 220, 250, 300, 350, 400, 4330mm의 7종류로 구성되며, Table 1과 같은 순서로 저장된다.

4. 단순보 예제의 해석결과

규격화한 제품의 데이터를 이용한 이산화 최적구조설계 프로그램의 검증을 위해서 Fig. 4와 같은 단순보 예제를 채택하여 해석결과를 검토한다. Table 1과 같은 생산제품의 번호를 설계변수로 개발된 프로그램의 비교대상으로 형상 파라메타를 설계변수로 이용하는 최적설계 방법과 비교한다. 대상 예제로 채택된 단순보는 Fig. 4에서 보는바와 같이 스패น(L) 10 m이며, 등분포 하중(w)와 집중하중(P)가 작용하는 경우를 고려하기로 한다.

재료는 탄성계수(E)와 포와송 비(ν)가 각각 210 GPa 및 0.3이며, 항복응력 f_y 는 각각 240, 270, 300, 330 MPa의 값을 이용한다. 이산데이터를 이용하는 설계변수의 값은 Table 1의 번호와 동일한 값을 이용하며, 396개의 단면번호에 의해서 정의되어 설계되며, 연속설계변수를 이용할 경우 경계조건은 식 (10)과 같다. 두 방법 모두 처짐에 관한 제약은 $\delta_{limit} = L/300$ 로 하며, 부재응력에 대한 제약조건은 최대 휨모멘트와 최대전단력만을 고려한다.

Table 1. Standard Products Data of Sinusoidal Corrugated Web Beam[26] (unit: mm)

	b_f	t_f	h_w	t_w
1	200.0	10.0	500.0	2.0
2	220.0	10.0	500.0	2.0
3	250.0	10.0	500.0	2.0
4	200.0	12.0	500.0	2.0
5	220.0	12.0	500.0	2.0
6	250.0	12.0	500.0	2.0
7	300.0	12.0	500.0	2.0
8	220.0	15.0	500.0	2.0
9	250.0	15.0	500.0	2.0
10	300.0	15.0	500.0	2.0
11	350.0	15.0	500.0	2.0
12	250.0	20.0	500.0	2.0
13	300.0	20.0	500.0	2.0
14	350.0	20.0	500.0	2.0
15	400.0	20.0	500.0	2.0
16	300.0	25.0	500.0	2.0
17	350.0	25.0	500.0	2.0
18	400.0	25.0	500.0	2.0
19	430.0	25.0	500.0	2.0
20	350.0	30.0	500.0	2.0
21	400.0	30.0	500.0	2.0
22	430.0	30.0	500.0	2.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
375	200.0	10.0	1500.0	3.0
376	220.0	10.0	1500.0	3.0
377	250.0	10.0	1500.0	3.0
378	200.0	12.0	1500.0	3.0
379	220.0	12.0	1500.0	3.0
380	250.0	12.0	1500.0	3.0
381	300.0	12.0	1500.0	3.0
382	220.0	15.0	1500.0	3.0
383	250.0	15.0	1500.0	3.0
384	300.0	15.0	1500.0	3.0
385	350.0	15.0	1500.0	3.0
386	250.0	20.0	1500.0	3.0
387	300.0	20.0	1500.0	3.0
388	350.0	20.0	1500.0	3.0
389	400.0	20.0	1500.0	3.0
390	300.0	25.0	1500.0	3.0
391	350.0	25.0	1500.0	3.0
392	400.0	25.0	1500.0	3.0
393	430.0	25.0	1500.0	3.0
394	350.0	30.0	1500.0	3.0
395	400.0	30.0	1500.0	3.0
396	430.0	30.0	1500.0	3.0

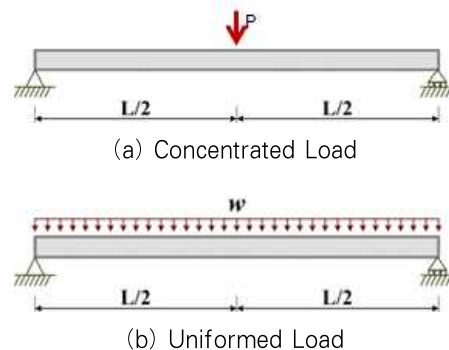


Fig. 4 Boundary Condition and External Load of Simple Beam Example

$$10 \leq b_f \text{ (or } h_w) \leq 3000 \quad (8a)$$

$$1 \leq t_f \text{ (or } t_w) \leq 300 \quad (8b)$$

적용되는 하중 범위는 집중하중의 경우 100kN에서 1,000 kN 사이의 값을 가지며 100kN씩 증가된 값을 이용하도록 하며, 등분포 하중의 경우는 10kN/m에서 100kN/m 사이의 값에서 10kN/m씩 증가시켜 적용하였다. 이와 같은 하중 범위와 증가하는 값의 적용은 설계전단력이 두 하중 모두에서 동일한 값으로 적용될 수 있게 한 것이다.

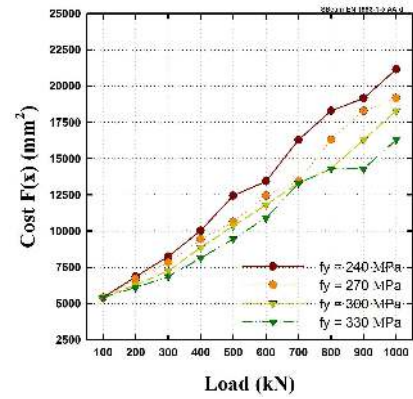
사인형 주름웨브보의 최적설계를 위해 채택한 유전자 알고리즘의 확률변수는 손수덕 등⁽¹⁸⁾의 문헌에서 제시하는 교배 확률과 돌연변이확률을 이용하도록 하며, 세대수도 수렴성과 해의 정도를 높일 수 있는 충분히 많은 수의 개체를 이용하도록 한다.

4.1 집중하중 단순보 예제의 최적설계

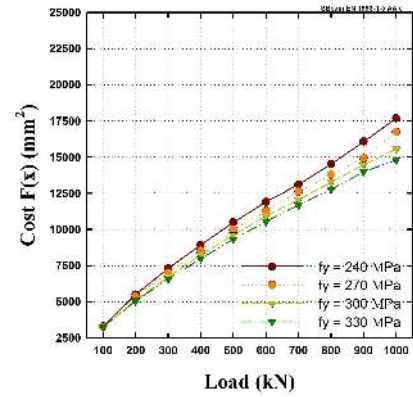
Fig. 4(a)와 같이 보의 중앙부에 집중하중이 작용하는 단순보 예제의 최적설계 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, Fig. 5(a)와 5(b)는 각각 이산화 최적설계 및 연속최적설계 결과이다. 그림에서 연속변수 및 이산화 설계변수 모두 항복강도 f_y 가 증가할수록 최적단면적은 감소하며, 하중의 증가에 대해서는 최적단면적이 증가한다. 이와 같은 결과는 구조설계의 일반적인 특성을 잘 설명해 주고 있다. Fig. 5(a)와 5(b)에서 나타난 두 최적설계를 비교해 볼 때 생산부재 데이터를 이용한 이산화 최적설계의 결과가 연속최적설계의 결과보다 높게 나타난다.

두 최적구조설계의 단면적 차이를 Fig. 6에 나타내었고 각각의 최적단면적 차이를 Table 2에 나타내었다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 생산부재의 단면적을 이용한 최적설계의 경우 최적단면적은 증가한다. 우선, 낮은 가장 낮은 집중하중인 100kN에서는 항복강도에 관계없이 약 65%의 차이를 보였고, 이산화 최적설계가 높게 나왔다. 하중 레벨의 증가는 두 최적결과의 차이를 점점 줄어들게 하였으며, 하중이 300kN 이 후 부터는 최대 26.01%, 최소 1.45%의 차이가 발생하였다. 항복강도의 증가에 따라서 두 최적단면적의 차이는 낮아지는 경향은 있지만 모두 그러한 것은 아니다. 두 결과의 차이에 있어서 $f_y=240\text{MPa}$ 의 경우 400kN에서 12.31%, $f_y=270\text{MPa}$ 는 700kN에서 6.46%, $f_y=300\text{MPa}$ 는 400kN에서 7.57%, $f_y=330\text{MPa}$ 는 500kN에서 1.45%로 가장 작은 차이를 보였다. 이 결과로 볼 때, 매우 낮은 하중에서는 이산화 최적설계방법은 생산부재 데이터 내에서 최소단면을 채택하므로 연속최적설계의 결과와는 차이가 많이

나게 된다. 또한, 항복강도에 따라 다르지만 약 500kN 부근의 하중 값에서 단면적 차이가 비교적 작다.



(a) Discrete



(b) Continuous

Fig. 5 Optimum Design Results of Simple Beam (Concentrated Load)

Table 2. Comparison Between Discrete Optimum Results and Continuous One (Concentrated Load)

$P \text{ (kN)}$	f_y	최적 단면적 차이 $\left(\frac{F(X)_{\text{discrete}}}{F(X)_{\text{Continuous}}} - 1 \right) * 100(\%)$			
		240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
100		64.36	65.14	65.28	65.28
200		24.68	24.43	23.46	20.93
300		12.69	11.66	7.94	4.23
400		12.31	10.38	7.57	1.89
500		18.61	6.61	7.61	1.45
600		12.81	10.07	7.96	3.32
700		24.36	6.46	10.19	13.84
800		26.01	18.35	7.84	11.96
900		19.17	22.63	12.53	2.22
1000		19.67	14.41	17.67	10.02

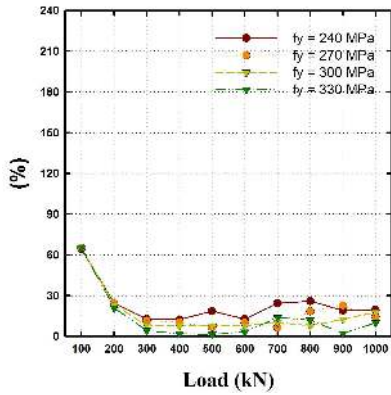


Fig. 6 Comparison Between Discrete Optimum Results and Continuous One (Concentrated Load)

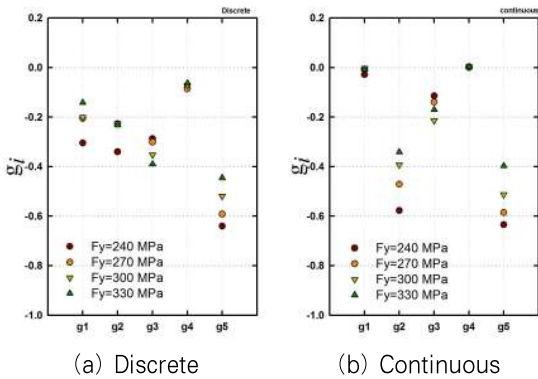


Fig. 7 Constraint Functions of Simple Beam Example (Concentrated Load)

이러한 결과는 이산화 최적설계의 경우 부재의 생산데이터를 이용하므로 설계조건에 꼭 맞는 최적의 단면이 규격화된 생산부재 데이터에 있을 수는 없기 때문이며, 식 (4)의 제약조건에 대한 g_i 함수 값을 통해서 두 방법에 대한 이와 같은 특징을 살펴볼 필요가 있다.

두 최적설계 결과에 대한 제약조건의 상태를 알아보기 위해서 하중의 변화에 따라 최적해로 채택된 단면에 대해 각각의 제약함수 g_i 값의 평균을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서, Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 이산화 최적설계 및 연속최적설계에 대한 결과이며, 평균값이 0에 가까울수록 최적설계의 결과는 제약조건의 경계에 위치하고 있음을 의미한다. Fig. 7(a)의 이산화 최적설계의 결과에서 볼 때, 모든 제약함수의 평균값은 비교적 0에서 멀리 떨어져 있다. 반면, Fig. 7(b)의 연속최적설계의 경우 제약조건 중 플랜지의 부재력에 대한 제약조건인 g_4 의 평균값은 0에 일치한다. 또한 웨브의 세장비 제약조건인 g_1 도 이산화 최적설계와 비교해 0에 매우 가까운 값으로 나타난다. 제약조건별 최적설계의 영향을 살펴보면, 이산화 최적설계는 0에 가장 가까운 제약함수가 플랜

지의 부재력에 대한 조건이며, 웨브의 세장비, 플랜지의 세장비에 대한 제약조건의 순서로 나타났으며, 연속최적설계의 경우는 플랜지의 부재력, 웨브의 세장비, 웨브의 부재력에 관한 제약조건의 순서로 나타났다.

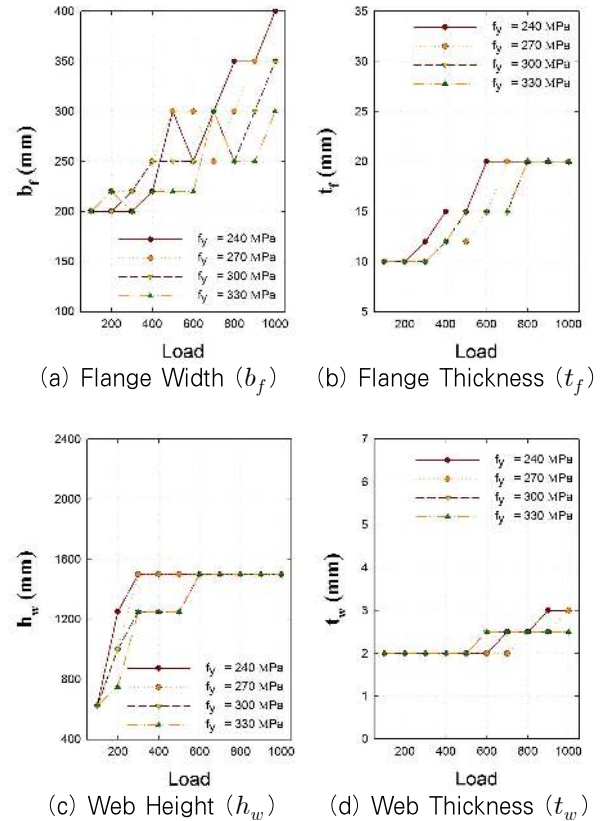


Fig. 8 Design Parameters of Optimum Cross-Section of Simple Beam (Concentrated Load - Discrete)

하중에 따른 최적화 단면의 형상변수를 Fig. 8에 나타내었다. 각각의 변수들은 하중의 증가에 따라 대부분 증가하는 양상을 보이고 있으며, 최적단면적이 증가하는데 따른 불연속적인 값의 변화를 잘 나타내 주고 있다. 그림에서 나타나는 변수의 변화들은 규격화된 생산부재의 불연속 설계변수를 이상적으로 반영하고 있으며, 사용되는 이산화 데이터의 단면 특성과 해석모델의 조건에 따라 변수의 변화폭도 다르게 나타날 것이다.

4.2 등분포하중 단순보 예제의 최적설계

Fig. 4(b)와 같은 등분포하중을 받는 단순보 예제의 최적설계결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 설계전단력은 집중하중 모델과 동일하지만 설계모멘트는 작은 경우가 된다. 집중하중의 경우와 마찬가지로 이산화 최적설계 및 연속최적설계를 모두 수행하여 그 결과를 Fig. 9(a)와 9(b)에 나타내었다.

그림에서 연속변수 및 이산화 설계변수 모두 항복강도 f_y 가 증가할수록 최적단면적은 감소하며, 하중의 증가에 대해서는 최적단면적이 증가한다. 이와 같은 결과는 집중하중의 경우와 동일하며, 구조설계의 일반적인 특성을 잘 설명해 주고 있다. Fig. 9(a)와 9(b)에서 나타난 두 최적설계를 비교해 볼 때 생산부재 데이터를 이용한 이산화 최적설계의 결과가 연속최적설계의 결과보다 높게 나타나며, 이와 같은 특성은 집중하중의 경우와 동일한 것이다.

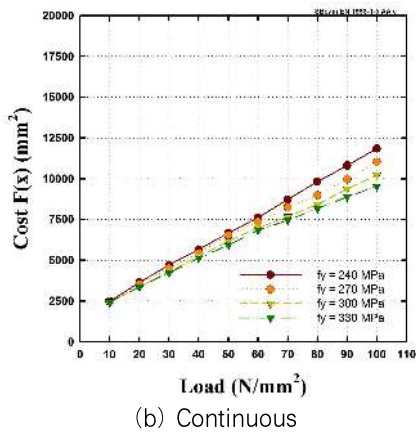
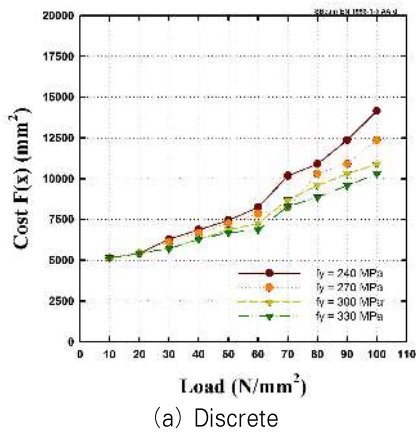


Fig. 9 Optimum Design Results of simple Beam (Uniformed Load)

두 최적구조설계의 단면적 차이를 Fig. 10에 나타내었고 각각의 최적단면적 차이를 Table 3에 나타내었다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 생산부재의 단면적을 이용한 최적설계의 경우 최적단면적은 증가한다. 우선, 낮은 가장 낮은 집중하중인 10kN/m에서는 약 110%의 차이를 보였고, 이것은 이산화 최적설계가 두 배 이상 높게 나왔음을 의미한다. 하중 레벨의 증가는 두 최적결과의 차이를 점점 줄어뜨리게 하였으며, 하중이 40kN/m 이 후 부터는 차이가 30%이하로 나타나며, 항복강도에 따라 다르지만 최대 113.17%에서 최소

0.23%의 단면적 차이가 난다. 항복강도의 증가에 따라서 두 최적단면적의 차이는 낮아지는 경향이 있지만 모두 그러한 것은 아니다. 표에서 알 수 있듯이 $f_y=240\text{MPa}$ 의 경우 60kN/m에서 8.16%, $f_y=270\text{MPa}$ 은 70kN/m에서 0.62%, $f_y=300\text{MPa}$ 은 60kN/m에서 3.85%, $f_y=330\text{MPa}$ 의 경우는 60kN/m에서 0.23%로 가장 작은 차이를 보였다. 이 결과로 볼 때, 매우 낮은 하중에서는 이산화 최적설계방법이 생산부재 데이터 내에서 최소단면을 채택되는 까닭에 연속최적설계의 결과와는 차이가 많이 나게 되며, 이것은 집중하중의 경우와 동일한 현상이다. 또한, 항복강도에 따라 다르지만 약 62.5kN/m 부근의 하중 값에서 단면적 차이가 비교적 작게 나타나며, 집중하중의 경우에서 나타난 500kN의 값과 비교해 볼 때 예제의 길이가 10m인 것을 고려하면 유사한 레벨의 하중에 해당된다.

Table 3. Comparison Between Discrete Optimum Results and Continuous One (Uniformed Load)

w (kN/m)	f_y 최적 단면적 차이 $\left(\frac{F(X)_{\text{discrete}}}{F(X)_{\text{Continuous}}} - 1 \right) * 100(\%)$			
	240MPa	270MPa	300MPa	330MPa
10	107.19	109.06	108.75	113.17
20	49.21	53.05	61.71	59.87
30	33.41	35.47	32.95	35.32
40	21.15	23.33	20.08	22.56
50	11.43	11.18	11.32	12.81
60	8.16	6.45	3.85	0.23
70	16.59	0.62	13.28	11.41
80	11.07	14.61	13.77	8.43
90	14.38	9.44	9.69	7.78
100	19.43	12.20	6.69	7.91

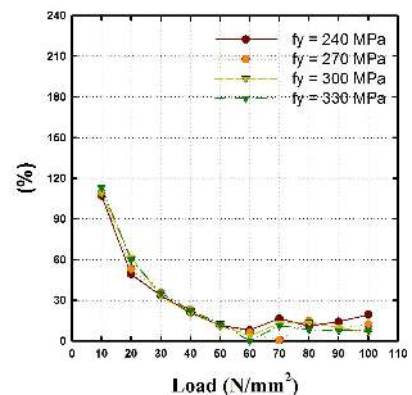


Fig. 10 Comparison Between Discrete Optimum Results and Continuous One (Uniformed Load)

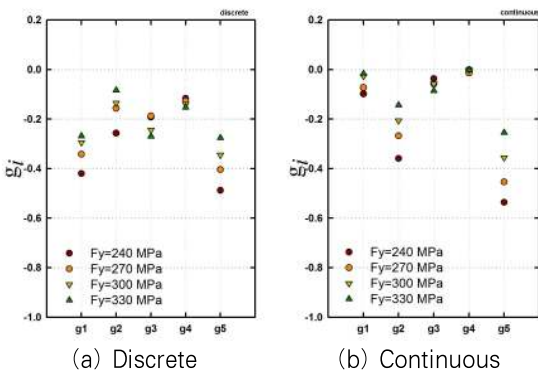


Fig. 11 Constraint Functions of Simple Beam Example (Uniformed Load)

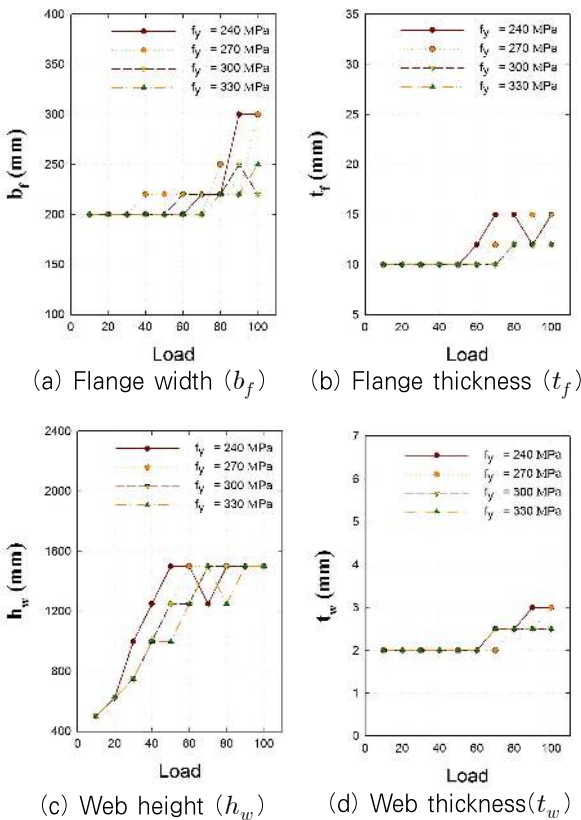


Fig. 12 Design Parameters of Optimum Cross-Section of Simple Beam (Uniformed Load - Discrete)

이러한 결과는 이산화 최적설계는 부재의 생산데이터를 이용하므로 설계조건과 일치하는 최적의 단면이 규격화된 생산 부재 데이터에 있을 수 없기 때문이며, 식 (4)의 제약조건에 대한 g_i 함수 값을 통해서 두 방법에 대한 이와 같은 특징을 살펴볼 필요가 있다.

두 최적설계 결과에 대한 제약조건의 상태를 알아보기 위해서 하중의 변화에 따라 최적해로 채택된 단면에 대해 각각의 제약함수 g_i 값의 평균을 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, Fig. 11(a)와 11(b)는 각각 이산화 최적설계 및 연속최적설

계에 대한 결과이다. Fig. 11(a)의 이산화 최적설계의 결과에서 볼 때, 모든 제약함수의 평균값은 비교적 0에서 멀리 떨어져 있는 반면, Fig. 11(b)의 연속최적설계의 경우 제약조건 중 플랜지의 부재력에 대한 제약조건인 g_4 의 평균값은 0에 일치한다. 또한 웹의 세장비 제약조건인 g_1 과 웹의 부재력 제약조건인 g_3 도 이산화 최적설계와 비교해 0에 매우 가까운 값으로 나타난다. 제약조건별 최적설계의 영향을 살펴보면, 이산화 최적설계는 0에 가장 가까운 제약함수는 플랜지의 세장비와 부재력에 대한 조건이며, 웹의 부재력이 그 다음 순서로 나타났으며, 연속최적설계의 경우는 플랜지의 부재력과 그다음으로 웹의 세장비 및 부재력에 관한 제약조건의 순서로 나타났다.

하중의 변화에 따른 최적설계의 결과단면의 형상변수를 Fig. 12에 나타내었다. 각각의 변수들은 하중의 증가에 따라 증가하는 양상을 보이고 있으며, 최적단면적이 증가하는데 따른 불연속적인 값의 변화를 잘 나타내 주고 있다. 또한, Fig. 8과 비교해 볼 때 형상변수들은 등분포하중의 경우가 집중하중의 경우보다 낮게 나타나며, 이것은 설계모멘트가 집중하중의 경우가 더 크기 때문으로 생각된다.

4.3 소결

집중하중과 등분포하중을 받는 단순보 예제의 최적단면의 변화는 하중이 증가함에 따라 단면적이 증가하며, 항복강도가 증가함에 따라 단면적은 감소한다. 이것은 강구조물의 설계에서 나타나는 일반적인 구조설계의 특성을 잘 설명해 주고 있는 것이다. 주름웹보의 최적설계의 경우 이산화 최적설계의 경우가 연속최적설계에 비해 더 큰 단면적으로 설계가 되며, 하중이 낮은 경우에는 그 차이가 크다. 이와 같은 현상은 하중이 낮은 경우 이산화 최적설계는 생산되는 부재의 데이터에서 가장 작은 단면을 선택하게 되며, 더 이상 작은 단면적을 데이터에서 얻을 수 없기 때문이다. 또한 일정 수준의 하중을 넘어서면 두 최적설계방법의 차이는 비교적 일정한 수준에 머무르게 되며, 항복강도에 따라 다르지만 집중하중의 경우 약 500kN의 하중레벨에서 차이가 가장 작아지며, 등분포하중의 경우 약 62.5kN/m의 하중레벨에서 차이가 가장 작아진다. 다루어진 예제의 길이가 10m인 것을 감안하면, 두 레벨은 비교적 유사한 레벨이다.

최적설계의 특성에서 이산화 및 연속최적설계 모두 제약조건식을 위배하지 않았으며, 연속최적설계의 경우가 이산화 최적설계의 경우보다 제약조건의 경계에 근접한 설계를 하였다. 즉, 연속최적설계가 제약조건을 잘 만족하는 단면으로 설계되고 있으나, 이산화 최적설계의 경우 제약조건에 대해 매우 여

유가 있는 단면으로 설계된다. 그러나 이산화 최적설계와 연속최적설계의 값에서 볼 때, 비록 최적단면적은 증가한다 하더라도, 현실적인 구조설계의 관점으로 볼 때는 연속최적설계의 값을 이용한 설계는 매우 불합리하다. 이것은 제작과 생산의 관점을 고려해 볼 때, 생산되는 부재단면 데이터를 이용하는 이산화 최적설계의 결과가 보다 더 합리적이다.

5. 결론

본 연구는 사인형 주름 웨브를 갖는 보의 부재 데이터를 이용한 이산화 최적구조설계 방법과 프로그램을 개발에 대해서 연구하였다. 최소중량설계를 위해서 부재 중량을 목적함수로 최적화 문제를 형성하였고, EN 1993-1-5 D항을 이용하여 주름웨브의 전단좌굴응력에 대한 제약함수를 구성하였다. 개발된 최적설계프로그램은 전역해 탐색기법인 실변수 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 이산화를 위해서 실수변수를 정수변수로 변환하여 코딩하였다. 해석결과를 검증하기 위해서 집중하중과 등분포하중을 받는 단순보 예제에 적용하여 최적단면적과 제약함수 및 단면특성을 연속최적설계와 비교하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 개발된 사인형 주름웨브보의 이산화 최적설계 프로그램의 해석결과는 제약조건을 위배하지 않는 전역 최적해의 결과를 얻을 수 있었으며, 채택된 수치해석 예제의 연속변수 최적설계의 결과와 비교해서 최적해의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
 - (2) 부재의 데이터를 이용한 이산화 최적설계프로그램의 결과는 집중하중과 등분포하중을 받는 단순보 예제에서 하중의 증가에 따라 최적단면적이 증가하였으며, 항복강도의 증가에 따라 단면적이 감소하는 결과를 얻었다. 이것은 연속변수 최적설계에서도 동일한 양상으로서 신뢰할 수 있는 결과이다.
 - (3) 제약함수와 설계변수의 변화 결과를 통해 볼 때, 제안된 설계방법을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며, 이산화 최적설계가 연속변수 최적설계에 비해 더 여유 있는 단면으로 설계되며, 이와 같은 결과는 제약조건의 함수값의 분포로 알 수 있었다.
 - (4) 개발된 이산화 최적설계프로그램의 해석결과들은 부재 데이터를 이용한 설계방법을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며, 채택된 단순보 예제에서 하중의 증가에 따른 단면적의 증가는 단면의 치수의 변화도 나타나고 있었으며, 이산 변수의 결과를 잘 반영하고 있었다.
- 생산과 제작의 조건을 고려하지 않는 연속변수의 최적설계

가 제약조건을 잘 만족하는 단면이기는 하지만, 현실적인 구조설계의 관점으로 볼 때는 매우 불합리하며, 부재의 제작을 고려해 볼 때, 생산되는 부재단면 데이터를 이용하는 이산화 최적설계의 결과가 보다 더 합리적이며 실무설계에서 실현가능한 결과를 얻게 되는 것이다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

- [1] 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.
- [2] Elgaaly, M. and Dagher, H. (1990) Beams and Girders with Corrugated Webs, Proceedings, SSRC Annual Technical Session, Bethlehem, PA, pp.37-53.
- [3] 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, pp.361-387.
- [4] 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.
- [5] Abbas, H.H. (2003) Analysis and Design of Corrugated Web I-girders for Bridges using High Performance Steel, Ph.D dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Pa.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 김성남, 전진수, 느규엔 반 반, 강영중(2008) 파형 복부판을 갖는 I형 거더의 비틀림 거동 연구, 2008년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.407-410.
Kim, S.N., Jun, J.S., Nguyen, Van Ban and Kang, Y.J. (2008) Study on Torsional Behavior

- of I-Girder with Corrugated Webs, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp.407-410 (in Korean).
- [9] 이재민, 김성남, 한금호, 강영중(2009) 파형 복부판 I형 거더의 비틀림 거동에 대한 해석적 연구, 2009년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.119-120.
Lee, J.M., Kim, S.N., Han, K.H., and Kang, Y.J. (2009) Analysis of Torsional Behavior of Corrugated Web I-girder, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp.119-120 (in Korean).
- [10] 뉴웬 녹 응, 김성남, 강영중(2010) 순수휨을 받는 사인 파형 복부판 I형 거더의 횡-비틀림 좌굴 강도, 2010년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.77-78.
Nguyen, N.D., Kim, S.N., and Kang, Y.J. (2010) Lateral-torsional buckling strength of I-girder with sinusoidal web corrugations under uniform bending, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp.77-78 (in Korean).
- [11] 김성남, Ngoc Duong Nguyen, 한승룡, 강영중(2011) 파형 복부판 거더의 횡비틀림 좌굴 강도, 2011년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.125-126.
Kim, S.N., Ngoc Duong Nguyen, Han, S.R., and Kang, Y.J. (2011) Lateral-Torsional Buckling Strength of Corrugated Web I-Girder, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp.125-126 (in Korean).
- [12] 오재열, 이득행, 김강수, 황진하(2011) 파형보의 아코디온효과에 대한 해석적 연구, 2011년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp.285-286.
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, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, pp.285-286 (in Korean).
- [13] 지효선(2011) 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 좌굴거동, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.221-228.
Ji, H.S. (2011) Buckling Behaviors of Plate Girder with Corrugated Steel Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 2, pp.221-228 (in Korean).
- [14] Siokola, W. and Poster, H. (1999) Fabrication Tools for Corrugated Web I-beams, *Modern Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, pp.42-45.
- [15] Pasternak, H. and Hannebauer (2004) 4. Trager mit profilierten Stegen, *Stahlbau Kalender 2004*, Ernst & Shon, German, pp.449-492.
- [16] Pasternak, H. and Kubieniec, G. (2010) Plate girders with corrugated webs, *Journal of civil engineering and management*, No. 16(2), pp.166-171.
- [17] 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.
- [18] 손수덕, 이승재(2011) 실수형 유전자 알고리즘을 이용한 사인형 주름 웹 보의 최적구조설계, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.581-593.
Shon, S.D. and Lee, S.J. (2011) Optimum Structural Design of Sinusoidal Corrugated Web Beam Using Real-valued Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 5, pp.581-593 (in Korean).
- [19] 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.
- [20] Mitchell, M. (1999) An Introduction to Genetic Algorithms, MIT press.
- [21] 이말숙, 윤영묵, 손수덕(2006) 개선소성현지해석과 유전자 알고리즘을 이용한 평면 강골조 구조물의 퍼지최적설계, 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp.147-160.
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 Korean Society of Steel Construction*, Vol. 18, No. 2, pp.147-160 (in Korean).
- [22] 김종성, 손수덕(2001) 박공형 철골건물의 GA와 동적계획법을 이용한 최적설계에 관한 연구, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제17권, 제11호, pp.51-58.
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, No. 11, pp.51-58 (in Korean).
- [23] DASt-Richtlinie 015 (1990) Trager mit schlanken

Stegen, Stahlbau-V., German (in German).
 [24] DIN 18800 (1990) Stahlbauten Teil 1-3, German (in German).
 [25] EN 1993-1-5(1993), Eurocode 3 - Design of steel

structures - Part 1-5 Plated structural elements.
 [26] Siokola, W. (1999) Wellstegtrager Technische Dokumentation, 2. Auflage, Zeman & Co Gesellschaft mbH, Wien (in German).

요 약 : 박스형 거더나 박공형 철골조 프레임에서 주름웨브보의 사용은 최근 많이 늘어가고 있다. 그 이유는 얇은 주름웨브보를 사용함으로써 압연형강이나 용접을 이용한 조립보에 비해 중량을 크게 줄일 수 있으며, 박판의 좌굴은 주름이 막아줄 수 있기 때문이다. 자동생산기술의 향상으로 인해 주름웨브를 가진 단위 부재를 양산할 수 있게 되어 적용분야가 확장되고 있으며, 주름웨브보의 부재 재원을 고려한 최적설계의 구현이 필요하게 된다. 이를 위해 본 논문에서는 주름웨브보의 생산부재 데이터를 고려한 이산화 최적구조설계 프로그램을 개발하여 집중하중과 등분포하중을 받는 주름웨브 단순보에 대해 적용하였다. 최소중량을 목적함수로, 세장비, 응력 및 처짐을 제약조건으로 채택하고, 전역최소값을 탐색하기 위해서 유전자 알고리즘을 채택하였으며, 생산부재의 번호를 불연속설계변수로 이용하였다. 최종적으로 해석설계의 검증을 위해서 이산화 최적설계 결과를 연속일 때의 결과와 비교하였으며, 최적단면 특성에 대해 분석하였다.

핵심용어 : 이산화 최적화, 주름웨브보, 사인형 주름, 유전자 알고리즘, 불연속 설계변수