

강 프레임 구조물 설계를 위한 의사 결정 지원 시스템의 개발

Development of Decision Support System for the Design of Steel Frame Structure

최 병 한^{1),†}

Choi, Byoung Han

요약 : 다른 복잡한 의사 결정 문제와 같이 구조설계는 많은 다른 기준들 사이의 상반관계에서 이루어지는 의사 결정 문제이다. 다양하게 수학적으로 프로그래밍 된 설계 기법이 점차 현실적인 요소를 감안하여 현실화되고 있으나 여전히 많은 설계의 제한, 즉 수학적으로 모델화 되지 못하는 많은 설계요소들과 관련되어 있다. 본 연구는 이러한 제한을 인식하고 강 프레임 구조물의 최적 설계에 관하여 다루어 지지 않은 설계요소를 감안하여 실무 설계자들에게 하나의 유일한 설계해가 아닌 다른 몇 가지 유용한 설계 대안을 제시할 수 있는 설계 시스템을 개발 하였다. 본 연구의 알고리즘에 의해 얻어진 설계 대안들은 모델화된 목적함수에 관해 최적의 해는 아니지만 매우 적합한 해들이며, 동시에 유일한 최적해와 비교 시 다른 설계 해로써 때로는 임의 모델화 되지 않은 설계요소에 관해서는 오히려 더 나은 결과를 나타내 준다. 본 연구는 횡 방향 하중에 효과적으로 저항하도록 보와 기둥이 모멘트 연결된 강 프레임 구조물을 대상으로 안정성에 문제가 없이 경비절감에 효과적인 설계를 위해 재료비뿐만 아니라 가설 시 부재연결에 소요되는 경비를 포함하는 최소 경비 설계를 위한 의사 결정 지원 시스템을 개발하고자 한다. 본 시스템은 최적 설계해에 대한 설계대안을 생성하기 위한 변형된 최적화 문제형식으로, 이때 최적 설계해는 하중저항계수설계법에 따른 비선형 해석과정과 유전알고리즘을 바탕으로 한 최적화 알고리즘을 결합한 알고리즘을 반복 수행하여 얻은 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계로부터 결정된다. 유용성 평가를 위해 생성된 각 설계대안을 다양한 설계요소에 관해 고찰하였다.

ABSTRACT : Structural design, like other complex decision problems, involves many trade-offs among competing criteria. Although mathematical programming models are becoming increasingly realistic, they often have design limitations, that is, there are often relevant issues that cannot be easily captured. From the understanding of these limitations, a decision-support system is developed that can generate some useful alternatives as well as a single optimum value in the optimization of steel frame structures. The alternatives produced using this system are "good" with respect to modeled objectives, and yet are "different," and are often better, with respect to interesting objectives not present in the model. In this study, we created a decision-support system for designing the most cost-effective moment-resisting steel frame structures for resisting lateral loads without compromising overall stability. The proposed approach considers the cost of steel products and the cost of connections within the design process. This system makes use of an optimization formulation, which was modified to generate alternatives of optimum value, which is the result of the trade-off between the number of moment connections and total cost. This trade-off was achieved by reducing the number of moment connections and rearranging them, using the combination of analysis based on the LRFD code and optimization scheme based on genetic algorithms. To evaluate the usefulness of this system, the alternatives were examined with respect to various design aspects.

핵심용어 : 의사 결정 지원 시스템, 설계 대안, 상반관계 연구, 강 프레임 구조물, 모멘트 연결

KEYWORDS : Decision-Support System, Alternative Design, Trade-Off Study, Steel Frame Structures, Moment Connections

1. 서론

구조 설계와 그 평가는 많은 시간과 경비를 요구하는 복잡한 의사 결정 문제이다. 특히 구조물의 최적 설계는 실 설계요소를 수학적으로 근사화한 모델을 활용하여 컴퓨터를 이용한 결

과이다. 근래의 연구에서 그 설계가 점차 현실화 되어가고 있지만, 아직도 설계 과정에서 여전히 모델화 되지 못하는 목적 함수나 제약조건식으로 인해, 최소 중량설계나 최소 경비 설계는 실무 설계자가 실제로 원하는 최종 결과를 산출해 주지는 못한다. 즉, 시공의 용이성, 손상에 대한 내구력, 구조물의 미

1) 교신저자. 정회원, Noth Carolina State Univ. Postdoc. Researcher, 공학박사
(Tel. 1-336-263-6865, E-mail:han1020@hotmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

적가치와 같은 설계요소들은 수식으로 모델화 되지 못하고 설계에서 배제되었으므로 이들에 대한 최소중량설계나 최소 경비 설계결과는 단순히 잠정적인 최적해에 불과하다.

구조 설계를 위한 의사 결정은, 중량이나 경비와 같이 수학적 식으로 근사화 될 수 있는 것들과는 달리, 종종 수학적 식으로 표현될 수 없는 이유로 최적화 모델에서 배제되는 목적함수나 제약조건과 관련된다. 예로써, 번잡한 도심권에서의 시공 시 추가로 소요되는 가설비의 경우, 수식으로 표현하기 어려우나 매우 중요한 설계요소로 작용한다. 따라서 이러한 이유로 실무 설계자들은 유일한 최적 설계해가 아닌 모델화된 목적함수와 제약조건식에 대해 만족할 만한 결과를 나타내는 몇 가지 설계 대안들을 대상으로 설계자의 전문적인 지식에 근거한 판단에 의해 이들 설계 대안 중 하나를 선택하는 방법을 선호할 것이다.

위에서 언급한 바와 같이, 비록 수학적으로 표현된 모델링이 불완전하지만, 이러한 모델에 의해 구현된 구조최적화는 모델화 되지 못한 설계요소에 대한 훌륭한 설계 대안을 제시할 수 있는 의사 결정 지원 시스템의 중요한 역할을 할 수 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 설계 시스템은 최적 설계 대안의 집합을 산출할 수 있는 다 목적함수를 갖는 수학적 계획법의 확장된 형태로서, 모델화된 목적함수나 제약조건식에 대한 유일한 최적해와는 최대한 다른 설계해를 가지면서 동시에 유용해 조건을 만족하는 설계해 집합을 산출하는 시스템이다. 이러한 설계 대안의 산출은 실무 설계자들이 모델화 되지 못한 목적함수나 제약조건을 만족하는 설계해를 고찰할 수 있는 기회를 주고 동시에 실제 최종설계에 적용될 설계해를 결정하는데 많은 도움을 줄 수 있다. 즉, 본 연구는 최적의 설계해를 찾기 위한 알고리즘뿐만 아니라 설계자의 전문적인 판단과 함께 유용할 수 있는 설계 대안의 생성까지도 고려한 의사 결정 지원 시스템이다.

본 연구의 이러한 설계 시스템의 적용을 위한 대상 구조물로는 부재연결이 모두 강결(Rigid Connection)된 강 프레임 구조물이다. 강 프레임 구조물은 지진이나 풍하중과 같은 횡 방향 하중에 저항하기 위하여 모멘트 연결(Moment-Resisting Connections)을 통해 부재가 연결된 강구조물의 형식으로 이는 브레이싱을 이용한 연결방법보다 훨씬 더 무거운 구조이다. 현재의 건설 환경에 따르면 이러한 강 프레임 구조물의 제작과정에서 높은 시공경비의 소요의 주된 요인으로는 강 재료비 외에 현장에서 가설 시 소요되는 높은 인건비를 들 수 있다. 특히 현장에서 가설을 위하여 이루어지는 용접과 같은 부재 연결에 소요되는 가설경비는 실제 강 프레임 구조물의 시공소요경비의 많은 부분을 차지한다. 또한 최적설계에서 주 목적은 총 소요 경비의 최소화이지만 실무에서는 종종 엔지니어의 최종설계를

위한 의사결정 과정 중 설계 여유와 같은 요인이 중시된다. 강 프레임 구조물의 설계에서 부재 간의 강결의 수는 이러한 설계 여유와 직접적으로 관련되는 것으로써 일반적으로 실무 엔지니어들은 총경비의 상승 요인인 부재 간의 강결의 수가 많은 설계를 선택함으로써 설계 여유를 확보한다. 이와 같은 설계환경을 감안한다면 재료비 절감뿐만 아니라 부재 간 강결의 수 및 배치는 현실적인 설계과정에서 간과할 수 없음을 의미한다. 실제로 실무 설계자 및 현장의 기술자들의 경험과 지문을 통해 강 프레임 구조물의 설계 시 모멘트 연결의 수를 줄임으로써 이와 관련된 현장 노무비의 감소와 공기의 단축으로 인하여 전체 건설경비의 커다란 경비절감을 이룰 수가 있음을 알 수 있으며, 반면에 최근의 건설 환경에서 노무비와 재료비의 차이의 증가량을 고려해보면 구조물의 가설 시 보-기둥 간 모멘트 연결 수의 감소로 인한 부재단면의 증가로 말미암은 재료비 증가는 위에서 언급한 경비 절감량에 비해 매우 적음을 알 수 있다.

이러한 건설환경의 변화에도 불구하고, 국내외의 다양한 최적 설계 기법을 적용한 연구들의 대부분은 최소 중량설계와 같은 전형적인 최적설계에 관한 연구이며, (장준호 등, 2000; 김창성 등, 2002; 박문호 등, 2002; 김승억 등, 2003; 최세휴 등, 2003; Grierson 등, 1984; Hager 등, 1988; Saka 등, 1998; Erbaturo 등, 2000; Kameshki 등, 2001; Isenberg 등, 2002; Pereyra 등, 2003; Yun 등, 2005; Camp 등, 2005; Xu 등, 2006) 몇 몇 소수의 연구(Xu 등, 1993; Simoes, 1996)만이 최소중량설계와 더불어 부재연결경비를 고려하였으나 이들 또한 단순히 목적함수에 부재연결 경비를 포함했을 따름이며 실무자들이 직접 유용할 만한 설계해는 제공하지 못하고 있다.

이상에서 언급한 바에 따라 본 연구에서는 강 프레임 구조물의 최소 경비 설계를 위하여, 재료비 외에 보-기둥 간 모멘트 연결을 이용한 강결 시 요구되는 경비를 포함한 경비함수를 고려하고자한다. 실제로 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 유전 알고리즘에 기초한 최적화 기법을 사용한 본 연구의 설계시스템을 이용하여 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상관관계(Trade-Off)를 통해 최적의 보-기둥 간 강결의 수 및 그 배치를 나타냄으로써 재료비와 노무비의 증감량에 따른 건설 환경의 변화에서 요구되는 최적설계를 수행하고, 이로부터 본 연구의 의사 결정 시스템에 의해 몇 가지 설계 대안을 생성하여 실무에서 이를 직접 활용하고자 한다.

2. 연구내용

본 연구의 대상 강 프레임 구조물의 보-기둥 간 부재연결은

전-강결(Fully-Rigid Connection)인 모멘트 연결(Moment-Resisting Connection)이라고 가정한다. 이러한 모멘트 연결에 의한 프레임 구조물은 휨과 축 방향력을 동시에 받는 구조로 보와 기둥 간의 각을 유지하기 위한 충분한 강성을 가진다. 이러한 부재 연결방법의 주된 기능은 보에 작용하는 하중을 기둥으로 전달하며, 횡방향 하중에 저항하는 것이다. 그리고 이러한 모멘트 연결의 배치는 단지 비대칭 구조물에서 나타날 수 있는 비틀림을 방지하기 위하여 구조물 내의 대칭성을 확보하기 위한 필요성에 따라 변화한다. 이러한 모멘트 연결은 보의 플랜지와 복부를 지지하는 기둥의 플랜지에 용접하는 것으로 이는 현장 소요 인건비와 직접 연관되는 것이다.

본 연구의 경비함수는 강 재료비와 보-기둥 간 부재 강결에 소요되는 가설경비 향으로 구성하였다.

$$C_T = C_m + C_c \tag{1}$$

여기서,

C_T : 총 경비

C_m : 강재 재료비

C_c : 보-기둥 간 부재 강결에 소요되는 경비

강재 재료비는 다음과 같으며,

$$C_m = c_m \rho V \tag{2}$$

여기서,

c_m : 재료비 단가(600원/kg)

ρ : 단위 중량

V : 구조물의 체적

보-기둥 간 부재 강결의 소요 경비로는,

$$C_c = c_c N_{rc} \tag{3}$$

여기서,

c_c : 한 개소 보-기둥 간 모멘트 연결에 소요되는 단가 (900,000 원/EA).

N_{rc} : 요구되는 보-기둥 간 모멘트 연결의 수.

실무에서 몇 가지 전형적인 용접방법에 따른 모멘트 연결방법이 있지만, 그림 1과 같은 강판을 이용한 플랜지 용접방법(Welded Flange Plate Connection)을 강 프레임구조물의 가설을 위한 연결방법으로 선정하고 실무 설계자들과 현장 기술자들의 자문을 통해 재료비, 제작비 및 시공비를 포함한 보-기둥 간 모멘트 연결 당 단가를 결정하였다. 기존의 연구에

서는 단지 프레임 구조물을 구성하는 보와 기둥의 단면이 설계변수였지만 본 연구에서는 각 보와 기둥의 연결 부위의 모멘트 연결방법의 유무를 나타내는 이진 설계변수를 고려한다. 또한 선정된 모멘트 연결의 수를 가지는 초기 해집단을 표현하기 위한 난수 생성방법 및 연산과정 중 위배를 방지하기 위한 제약조건을 사용하여 위에서 언급한 총경비와 모멘트 연결의 수 사이의 상반관계를 나타내고자 한다. 그리고 최적설계과정 중 효율적이며 정확한 해석을 위하여 하중저항계수설계법(LRFD)에 근거하고 P- Δ 효과를 고려한 비선형해석에 의해 휨, 전단, 처짐, 보-기둥 상관관계 값을 구하는 구조해석코드를 구성한다.

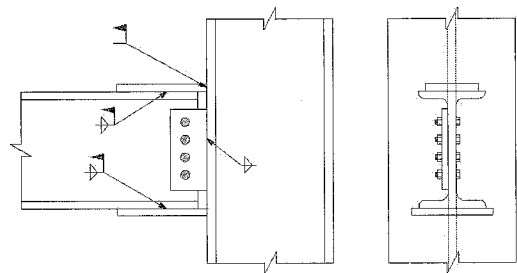


그림 1. 강판을 이용한 플랜지 용접

정리하면, 본 연구의 시스템은 최적설계알고리즘과 획득한 최적설계해로부터 설계대안을 생성하는 알고리즘으로 구성된다. 먼저 앞에서 제시한 해석과정과 유전알고리즘에 기초한 최적설계와의 통합된 최적설계알고리즘에 의해 실질적인 경비함수가 감소하는 한도 내에서 모멘트 연결을 힌지 연결로 대체하고, 필요하면 단면적이 보다 큰 제품으로 대체하는 방법으로 모멘트 부재연결의 수를 변화시키고 효율적인 배치를 나타내자 한다. 즉, 먼저 최소 중량설계를 실시한 후 이로부터 얻어진 설계값을 초기 설계값으로 하여 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 본 최적설계 알고리즘을 반복적으로 수행하여 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계를 구현하고 이로부터 최적의 모멘트 연결의 수와 그 배치를 결정한다. 그리고 이와 같은 최적 설계 해를 이용하여 몇 가지 설계 대안을 생성할 수 있는 개선된 최적설계 문제 형식을 바탕으로 한 설계 대안 생성 알고리즘을 개발하여 유용한 설계대안들을 생성하고 각 설계 대안들을 다양한 설계관점에서 고찰하고 평가하여 본 설계시스템의 적용성과 효과를 살펴보고자 한다.

3. 강 프레임 구조물의 최종설계를 위한 의사 결정 지원 시스템의 형성

3.1 최적설계 문제 형성

다층 다 경간 강 프레임 구조물에서 하나의 보는 양 단에서 이를 지지하는 기둥들과 두 개의 연결을 가진다. 따라서 S층 B 경간의 구조물의 경우 총 보의 수는 (S x B)이며, 이때 총 기둥과 보의 연결 수는 2(S x B)이다. 또한 총 보와 기둥의 수는 (2SB+S) 이다. 본 연구의 설계변수로는 먼저 사용하는 강 제품을 나타내는 P_i 로 모든 부재에 대하여 다음과 같이 표현되며

$$P_i = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{(2SB+S)}] \quad (4)$$

또 다른 설계변수 X_j 는 보와 이를 지지하는 기둥과의 연결 위치 j에 모멘트 연결의 유무에 따라 1과 0의 값을 가진다. 즉, 1은 모멘트 연결(강결)을 의미하고 0은 힌지연결을 의미한다. 따라서 유전알고리즘에 기초한 본연구의 최적설계 기법에 따른 해의 표현은 식(5)과 같다.

$$X_j = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2(S \times B)}] \quad (5)$$

본 연구의 경비함수로는,

$$C_T = c_m \sum_{i=1}^{(2SB+S)} W_{P_i} L_i + c_c \sum_{j=1}^{2(S \times B)} x_j \quad (6)$$

여기서,

C_T : 총 경비

c_m : 강재의 단위 무게 당 단가

c_c : 한 개소의 모멘트 연결 시 소요경비

W_{P_i} : 강 제품 P_i 의 단위 길이 당 무게(kg)

L_i : 부재 i의 길이(m)

제약조건으로는 하중저항계수법에 따른 강도, 사용성 제약 조건과 초기 선정된 모멘트 연결의 수에 대한 제약 및 실무에 입각한 부가적인 제약을 고려한다. 먼저 모멘트 연결의 수의 제약으로는 구조물의 모든 부재간 연결은 강결이라 가정하고 보와 기둥사이의 모멘트 연결의 수를 선정하여 유전알고리즘의 연산과정 중 이를 위해 시 벌칙을 부과함으로써 선정된 모멘트 연결의 수를 유지하도록 하였다.

강도 제약조건으로 강 프레임 구조물을 구성하는 모든 부재

들은 설계코드 하중저항계수설계편의 다음과 같은 상관관계식을 모든 하중조건에 따라 만족해야한다.

$$\begin{aligned} & \bullet \frac{P_u}{P_r} < 0.2 \text{ 인 경우} \\ & \left(\frac{P_u}{2.0P_r} + \frac{M_u}{M_r} \right) - 1.0 \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \bullet \frac{P_u}{P_r} \geq 0.2 \text{ 인 경우} \\ & \left(\frac{P_u}{P_r} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{M_r} \right) - 1.0 \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

P_u : 극한 축 하중

$$P_r = \Phi P_n \begin{cases} P_n: \text{공칭 축강도} \\ \text{인장시} & \text{식 (7)에서 } \Phi: 0.75 \\ & \text{식 (8)에서 } \Phi: 0.9 \\ \text{압축시} & \text{식 (7)(8)에서 } \Phi: 0.85 \end{cases}$$

M_u : 극한 휨 모멘트

$$M_r = \Phi_b M_n \begin{cases} M_n: \text{공칭 휨강도} \\ \Phi_b: 0.9 \end{cases}$$

P_n : 작용하는 하중에 따라 좌굴응력과 항복응력 및 부재 단면적을 이용하여 계산.

M_n : 플렌지 국부좌굴, 복부국부좌굴, 횡-비틀림좌굴을 고려하여 계산.

동시에 다음과 같은 전단강도 제약조건 역시 만족해야한다.

$$V_u - \phi_n V_n \leq 0 \quad (9)$$

여기서,

V_u : 극한 전단력

V_n : 공칭 전단강도로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \bullet \frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}} \text{ 인 경우} \\ & V_n = 0.6 f_{yw} A_w \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \bullet 2.45 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}} < \frac{h}{t_w} \leq 3.07 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ 인 경우} \\ & V_n = 0.6 f_{yw} A_w \left[\frac{2.45 \sqrt{E/f_{yw}}}{h/t_w} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \bullet 3.07 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}} < \frac{h}{t_w} < 260 \text{ 인 경우} \\ & V_n = A_w \left[\frac{4.52E}{(h/t_w)^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ϕ_n : 0.90

f_{yw} : 복부의 항복강도

A_w : 복부의 단면적

h : 상 하부 플렌지 사이 거리

E : 탄성계수

사용성 제약조건으로는 최대 가로흔들이(Side Sway) 변위 제약으로 각 층마다 다음과 같다.

$$\Delta - L/400 \leq 0 \tag{13}$$

여기서,

L : 층 높이(m)

Δ : 임의 층의 가로흔들이 변위

부가 제약조건으로는 실무적인 것으로서 종종 최적설계 결과로써 얻어진 각 기둥의 단면적을 확인해보면 임의 층의 기둥이 단면적이 위 층의 단면적 보다 더 작은 경우가 발생할 수 있다. 이런 경우 실제 현장에서 적용 시 그 연결에 있어서 문제가 됨으로 각 층의 기둥들의 단면은 반드시 연결되는 상위층의 기둥들의 단면적보다 크거나 같아야 한다는 것으로 다음과 같다.

$$A_c \geq A_{cabove} \tag{14}$$

여기서,

A_c : 임의 층의 기둥의 단면적

A_{cabove} : 임의 층 위 층의 기둥의 단면적

3.2 최적화 기법

전형적인 유전알고리즘의 경우 모든 설계변수들은 유전알고리즘의 표현 형태로 코딩되어야하며, 모든 제약조건들은 벌칙 매개함수를 이용하여 목적함수에 포함되어 진다. 그러나 이러한 전형적인 유전알고리즘에서 설계변수가 부재단면적과 같은 수 많은 형태일 경우 최적해의 탐색의 효율을 저하시키는 광활한 탐색공간을 초래 하게 된다. 그러나 본 연구에서는 총 경비를 감소시키는 P_i 에 해당하는 특정 제품이 존재하도록 함으로써 탐색공간의 영역을 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 P_i 를 설계변수로서 유전알고리즘의 형태로 표현할 필요는 없으며, 단지 X_j 만을 설계변수로 본 유전알고리즘에서 활용한다. 본 연구의 알고리즘은, 효율적이며 정확한 해석을 위하여 하중저항계수설계법(LRFD)에 근거하고 P- Δ 효과를 고려한 비선형 해석에 의해 휨, 전단, 처짐, 보-기둥 상관관계 값을 구하는 구조해석코드와 유전알고리즘을 결합한 설계 시스템이다. 따라서 본 연구에서 제시하는 최적설계 기법은 다음과 같은 두 단계로

구성된다. 첫 번째 단계는 최소 중량 강 프레임 구조물을 설계하고자 모든 연결이 모멘트 연결이라 가정하고 모든 부재의 강 제품을 결정한다. 두 번째 단계는 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계를 나타내기 위하여 앞의 단계에서 얻어진 최소 중량 설계의 해를 초기해로 하며, 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 본 최적설계 유전알고리즘을 매번 구동한다. 이때 각 구동은 선정된 모멘트 연결의 수에 대한 최소경비를 구하고자 하는 것으로 선정된 모멘트 연결 수만큼의 특정위치에만 모멘트 연결을 가지기 때문에 구조물 내에서 제약조건식에 대한 위배가 나타난다. 이러한 위배들을 가지는 해들은 다시 최소 경비를 가지도록 해당 부재의 사용 제품을 변화시킴으로써 유용 해로 바뀌게 된다.

3.2.1 최소 중량 설계

본 연구의 첫 번째 단계로는 모든 부재 연결을 모멘트 연결로 가정하고 최소 중량 설계를 실시하는 것으로 두 번째 단계의 초기설계 값을 제공하는데 그 목적이 있으며 그 개략적인 단계별 요약설명은 아래와 같다.

- 1단계 : 강 프레임 구조물의 모델링과 모든 부재에 초기치로 가장 가벼운 강 제품을 부여한다.
- 2단계 : 모든 하중조건에 따라 구조해석을 수행한다.
- 3단계 : 보-기둥 상관관계식 및 전단제약조건으로 표현되는 나타내는 강도 제약조건에 위배 되는 부재에 한해서 단면이 보다 큰 바로 위 단계의 강 제품을 부여한다.
- 4단계 : 임의 층의 기둥의 단면이 그 위층의 단면보다 커야 하며 그렇지 못할 시 위층의 단면과 동일하게 부여한다.
- 5단계 : 모든 하중조건에 따른 모든 부재의 강도제약조건이 만족될 때까지 위의 단계 2, 3, 4.를 반복 수행한다.
- 6단계 : 가로흔들이를 나타내는 변위제약조건에 위배되는 층에 한해서 다음과 같이 요구되는 단면2차모멘트 (δI)에 해당하는 강 제품을 찾아 해당 층의 보와 기둥에 부여한다.

$$\delta I = \frac{\Delta_u - \Delta}{\Delta} I(P_i) \tag{15}$$

여기서,

Δ_u : 극한 가로흔들이 변위 = $L/400$

Δ : 구조해석결과 가로흔들이 변위

$I(P_i)$: 현재 강 제품 P_i 의 단면2차모멘트

7단계 : 임의 층의 기둥의 단면이 그 위층의 단면보다 커야

하며 그렇지 못할 시 위층의 단면과 동일하게 부여한다.

8단계 : 각 층별 변위제약조건이 만족 될 때까지 위의 단계 6, 7.를 반복 수행한다.

9단계 : 모든 부재에 대한 최소 중량 강 제품 결정

$$P_i = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{(2SB+S)}] \quad (16)$$

3.2.2 2단계: 보-기둥간 모멘트연결의 설계

본 단계는 유전알고리즘에 기초한 알고리즘으로 앞 단계에서 얻어진 최소 중량 강 제품을 초기해로 하고 선정된 모멘트 연결을 갖는 최소 경비 설계 단계이다. 이를 통해 본 연구의 목적인 모멘트 연결의 수와 총경비와의 상반관계를 구하고자 한다. 설계변수로는 보와 기둥간의 연결부위에 모멘트 연결의 유무를 나타내는 것으로서 앞에서 언급한 식(5)와 같은 이진 코딩이다. 본 알고리즘의 적합도의 평가는 먼저 제약조건의 위배여부를 판단하여 위배가 있다면 앞의 1단계 과정을 이용하여 조건을 만족하도록 한 후 다음과 같은 적합함수를 이용하여 적합도를 평가한다.

$$F = -(C_T + P_s + P_d + P_c) \quad (17)$$

여기서,

F : 적합함수

C_T : 총 경비함수

P_s : 강도 제약조건의 위배에 대한 벌칙함수

$$P_s = \alpha \sum_{i=0}^{2SB+S} g_{s_i} \quad (18)$$

P_d : 사용성 제약조건의 위배에 대한 벌칙함수

$$P_d = \beta \sum_{i=0}^{2SB+S} g_{d_i} \quad (19)$$

P_c : 모멘트 연결의 수에 대한 벌칙함수

$$P_c = \gamma \left| \sum_{i=1}^{(SXB)} x_i - N_{rc} \right| \quad (20)$$

α, β, γ : 벌칙상수 = 1,000,000

g_{s_i} : I번째 부재의 강도제약조건의 위배

g_{d_i} : I번째 부재의 사용성제약조건의 위배

N_{rc} : 선정된 모멘트 연결의 수

x_i : 이산형 변수로써 각 기둥과 보의 연결부위의 모멘트 연결방법의 유무(1또는 0)를 나타내는 이산형 변수

선정된 모멘트 연결의 수(N_{rc})를 갖는 최소경비 해를 얻기 위한 유전 알고리즘의 연산자로는 다음과 같은 초기해(X_i) 설정 방법을 사용한다.

$$X_i = \begin{cases} 1 & \forall i \in C \\ 0 & \forall i \notin C \end{cases} \quad (21)$$

여기서,

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_{rc}}\} \quad (22)$$

c_i : 집합 $\{1, 2, \dots, N\}$ 으로부터 임의로 선정된 수로써 $c_i \neq c_j$ if $i \neq j$ 이다.

N_{rc} : 선정된 모멘트 연결의 수

N : 구조물의 보와 기둥사이의 모든 연결의 수

이와 같은 설정 방법을 통해 초기 해 집단의 모멘트 연결의 수에 대한 위배를 갖는 해 집단을 최소화 할 수 있다. 교배, 돌연변이, 재생산 연산자로는 균등교배와 단순돌연변이 및 토너먼트 연산을 활용한다.

하중저항계수설계법(LRFD)에 근거하고 P- Δ 효과를 고려한 비선형해석과정과 이상에서 설명한 바와 같은 연산자들로 구성된 유전알고리즘이 결합된 본 연구의 최적설계 알고리즘을 활용하여 선정된 모멘트 연결의 수에 따른 최적 설계 해 즉, 총경비의 경감 및 그 연결의 배치를 구할 수 있다. 또한 모멘트 연결의 수의 변화시키면서 본 알고리즘을 반복수행 함으로써 총 경비와 모멘트 연결의 수와의 상반관계를 규명하고 이를 통해 최적의 모멘트 연결의 수와 그 배치를 결정할 수 있다.

3.3 설계대안의 생성

위의 최적설계 알고리즘에 의해 얻어진 소요 모멘트연결의 수에 따른 최적 설계해들은 단지 모델화된 목적함수와 제약조건에 관한 최적해이므로 종종 최종 설계해로 채택되지 못한다. 실제로 실무에서 많은 설계요소들이 수식으로 표현되지 못하는 제약에 의해 설계에서 배제되기 때문에, 이러한 정식화 되지 못한 설계요소에 대한 위단계의 최적설계에 의해 얻어진 최적 설계해는 단순히 잠정적인 최적해에 불과하다. 또한 이러한 문제점은 이미 전형적인 최적설계의 문제점으로 지적되어오고 있는 바이다. 따라서 본 연구에서는 실무 설계자들이 모델화 되지 못한 목적함수나 제약조건을 만족하는 설계해를 고찰할 수

있는 기회를 주고 동시에 실제 최종설계에 적용될 설계해를 결정하는데 많은 도움을 줄 수 있도록 유일한 최적해와는 최대한 다르면서 동시에 유용한 설계 대안을 생성하는 변형된 최적화 문제형식을 고려했다.

일반적으로 같은 비트수를 가진 두 개의 2진수의 대응하는 각 자리를 비교하여 서로 다른 자릿수의 개수로 정의 되는 해밍 거리(Hamming distance)를 이용하여 유일한 최적해와 가장 다른 설계 대안을 산출하였다. 즉, 임의의 보-기둥간 모멘트 연결의 유무를 나타내는 임의의 두 설계해가 식(23), (24)와 같은 2진 스트링이 존재한다고 가정하면,

$$[x_{1a}, x_{2a}, x_{3a}, \dots, x_{2(S \times B)a}] \quad (23)$$

$$[x_{1b}, x_{2b}, x_{3b}, \dots, x_{2(S \times B)b}] \quad (24)$$

$$\delta_{ab} = \sum_{i=1}^{2(S \times B)} |x_{ia} - x_{ib}| \quad (25)$$

식(25)의 δ_{ab} 는 두 설계해 간의 해밍거리를 나타낸다.

이러한 해밍거리를 이용하여 최적 설계해로부터 임의의 n+1 번째 설계대안을 생성한다고 가정하면, 다음과 같은 해밍 거리의 최대화가 이루어진다.

$$\text{Maximize } \delta = \sum_{j=1}^n \delta_{aj} \quad (26)$$

또한, 앞 단계에서 얻어진 최적 설계해는 가장 경제적인 설계해이므로 실무 설계자들은 설계여유를 확보하기 위하여 경비가 이보다 약간 더 소요되는 설계대안에 관심을 가질 것이다. 따라서 식(27)과 같은 추가 제약조건을 고려한다.

$$\text{Subjected to } C_{Alter} \leq k C_{Opt} \quad (27)$$

여기서,

C_{Alter} : 임의의 설계대안의 총 경비

C_{Opt} : 최적 설계해의 총 경비

$k < 1$: 경비 승수

본 연구에서 사용한 위의 k 값은 실무기술자들의 경험에 비추어 1.1로 정하였다. 이는 설계대안을 탐색할 때, 설계대안의 총경비가 최적설계해의 총경비에 대하여 10% 이상 초과되지 않도록 설계공간을 축소하는 것을 의미한다.

정리하면, 총 경비의 최소화 대신에 식(26)의 해밍거리를 최대화 하고, 식(27)로 표현되는 경비제약을 추가하여 최적화 알고리즘을 완성한 후 이를 구동하여 설계대안을 생성한다.

4. 다층 다경간 강 프레임 구조물 최종설계를 위한 의사 결정 지원 시스템

본 연구의 강구조물의 설계를 위한 의사 결정 지원 시스템의 적용성과 효율성을 평가하기 위하여 실제 하중조건하에 그림 3과 같은 다층 다경간 강프레임 구조물을 대상으로 본 연구의 설계시스템을 적용하고자 한다. 이를 위해 1단계 최소중량설계를 통해 설계 초기해를 결정하고 2단계 유전알고리즘을 통해 모멘트 연결의 수를 줄여가며 반복 수행함으로써 모멘트 연결의 수와 총경비와의 상관관계를 규명, 이로부터 최적 설계해를 구하고, 얻어진 최적 설계해로부터 변환된 최적화 문제형식에 의한 설계 대안들을 생성하였다. 이상과 같은 본 시스템을 통해 얻은 각 설계 대안들을 몇 가지 설계관점에서 고찰하고 평가하여 본 설계시스템의 적용성과 효과를 살펴보았다.

4.1 본 시스템에 적용된 구조해석 결과의 검증

본 시스템의 평가에 앞서 먼저 적용된 구조해석의 결과의 검증을 통하여 본 시스템의 신뢰성을 나타내었다. 매트릭스 방법에 기초한 본 구조해석과정은 효율적이며 정확한 해석을 위하여 P- Δ 효과를 고려한 비선형해석을 수행한 것으로, 이를 범용 전산구조해석 프로그램인 SAP2000과 그 결과를 비교 검토하였다. 예로써, 그림 2와 같은 다양한 하중조건하의 2부재 프레임구조와 본 시스템의 평가 대상인 그림 3의 5층 5경간 프레임 구조물을 대상으로 구조해석결과를 비교하였다.

비교 결과 표 1, 2와 같이 아주 작은 차이를 나타냄으로써 만족할 만한 결과를 나타내었다.

4.2 1단계: 최소 중량설계

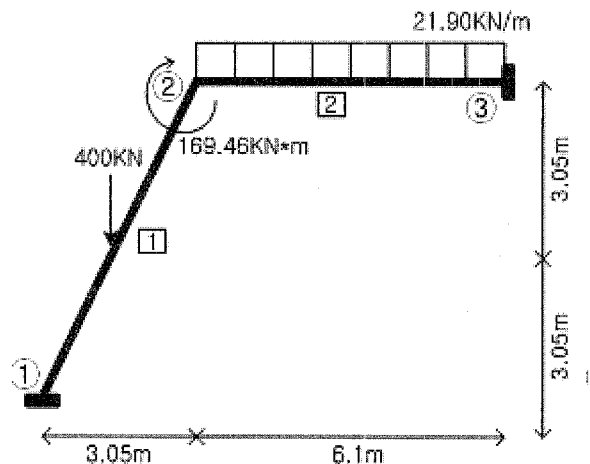


그림 2. 다양한 하중조건을 갖는 2부재 프레임 구조

최비한

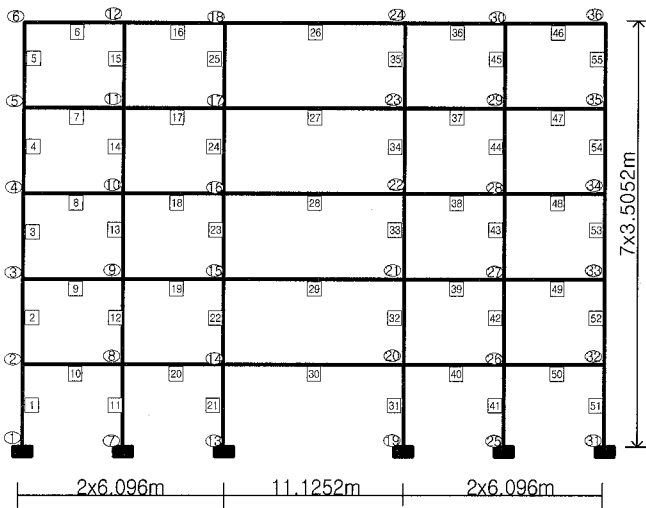


그림 3. 5층 5경간 강프레임 구조물

표 1. 2부재 프레임 구조물 구조해석결과(2번절점)

변위	본 연구 구조해석	SAP2000
Dx(mm)	0.5410	0.5410
Dy(mm)	-0.1854	-0.1854
Rz(Radian)	-0.0025	-0.0026

표 2. 5층 5경간 강프레임 구조물 구조해석 결과(풍하중만고려)

각 층 변위 Dx(mm)	본 연구 구조해석	SAP2000
1층	4.8768	4.8768
2층	12.2682	12.3698
3층	19.7866	20.1930
4층	25.8826	26.5430
5층	30.3530	31.1658

본 연구의 대상 구조물인 그림3과 같은 강 프레임 구조물에 모든 부재의 연결이 강결된 것으로 가정하고 3.2.1절에서 소개한 알고리즘을 이용하여 최소중량설계를 실시하여 다음 단계의 설계를 위한 초기해를 선정하고자 한다.

하중조건으로는 AISC Manual of Steel Construction For LRFD 3rd Edition에 따라 6가지의 하중조건을 표 3과 같이 고려하였다. 여기서 사하중은 1197N/m²(지붕:스틸텍킹, 조인트, 마감재 등), 2872N/m²(각층: 콘크리트스래브, 스틸텍킹, 덕트, 마감재 등)과 강프레임에만 작용하는 5276N/m(콘크리트 블록, 유리 등)을 고려하였으며, 활하중으로는 957N/m²(지붕), 4788N/m²(각층)을 고려하였으며, 풍하중으로는 572N/m²을 고려하였다. 이들 하중들을 각 부재에 분배하여 재하위치 및 형태별로 표 4와 같이 표시하였다. 또한 사용되는 강 제품으로는 중량에 비해 큰 단면2차 모멘트를 가지며 실무에서 주로 사용되는 제품으로서 보와 기둥에 따

라 표5와 같은 제품을 고려한다. 그 결과 표6과 같은 최소 중량 설계해를 구하였다.

표 3. 하중 조건

(D: 사하중, L: 활하중, W: 풍하중, Lr: 지붕활하중)	
하중 조건 I	1.4D
하중 조건 II	1.2D+1.6L+0.5Lr
하중 조건 III	1.2D+1.6W(→)+0.5L+0.5Lr
하중 조건 IV	1.2D+1.6W(←)+0.5L+0.5Lr
하중 조건 V	W(→)
하중 조건 VI	W(←)

표 4. 하중종류별 재하위치 및 하중크기

풍하중(W)	재하위치	하중크기
수평집중하중	절점번호	KN
	1,6 or (31,36)	32.11
	2,3,4,5 or (32,33,34,35)	64.18
사하중(D)	재하위치	하중크기
	절점번호	KN
수직집중하중	6,36	6.67
	12,30	26.68
	18,24	50.44
	2,3,4,5,32,33,34,35	44.92
	8,9,10,11,26,27,28,29	64.05
	14,15,16,17,20,21,22,23	195.27
수직등분포하중	부재번호	KN/m
	7~10,17~20,37~40,47~50	16.05
	27~30	8.66
	6,16,36,46	4.37
	26	1.16
활하중(L)	재하위치	하중크기
	절점번호	KN
수직집중하중	2,3,4,5,32,33,34,35	26.68
	8,9,10,11,26,27,28,29	106.75
	14,15,16,17,20,21,22,23	202.39
	부재번호	KN/m
수직등분포하중	7~10,17~20,37~40,47~50	17.51
	27~30	4.37
지붕활하중(Lr)	재하위치	하중크기
	절점번호	KN
수직집중하중	6,36	17.08
	12,30	68.32
	18,24	129.53
수직등분포하중	부재번호	KN/m
	6,16,26,36,46	2.77

표 5. 최소중량설계 결과

구분	강 제품	부재번호
기둥	W14x120	1,2,11,12,21,22,31,32,41,42,51,52
	W14x53	3,4,5,13,14,15,23,24,25,33,34,35,43,44,45,53,54,55
보	W18x35	8,9,10,18,19,20,28,29,30,38,39,40,48,49,50
	W12x14	6,16,36,46
	W14x22	7,17,26,37,47
	W16x26	27

표 6. 사용 강 제품

번호	기둥	보
1	W14x808	W40x215
2	W14x730	W40x199
3	W14x665	W40x211
4	W14x605	W40x183
5	W14x550	W40x167
6	W14x500	W40x149
7	W14x455	W36x194
8	W14x426	W36x135
9	W14x398	W33x130
10	W14x370	W33x118
11	W14x342	W30x116
12	W14x311	W30x108
13	W14x283	W30x99
14	W14x257	W30x90
15	W14x233	W27x84
16	W14x211	W24x84
17	W14x193	W24x76
18	W14x176	W24x68
19	W14x159	W24x62
20	W14x145	W24x55
21	W14x132	W21x55
22	W14x120	W21x48
23	W14x109	W21x50
24	W14x99	W21x44
25	W14x90	W18x40
26	W14x82	W18x35
27	W14x74	W16x40
28	W14x68	W16x31
29	W14x61	W16x26
30	W14x53	W14x26
31	W14x48	W14x22
32	W14x43	W12x26
33	W14x38	W12x22
34	W14x34	W12x19
35	W14x30	W12x16
36	W14x26	W12x14
37	W14x22	W10x12

* 각 강제품의 재료물성치는 참고문헌 "Manual of Steel Construction" 참조

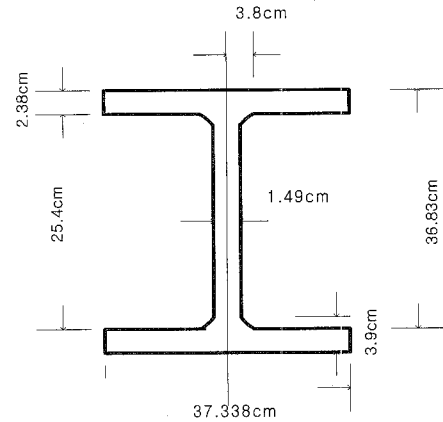


그림 4. W 형강 규격(예: W14x120)

4.3 2단계: 모멘트 연결의 수를 고려한 최소 경비설계

위 단계에서 얻어진 최소중량 설계 값을 초기 설계 해로 이용하여 3.2.2절에서 소개한 본 연구의 알고리즘에 의한 최소 경비설계를 수행하기 위하여 식(6)과 같은 경비함수를 이용하며, 각 경비함수의 단가 및 유전알고리즘의 연산과정 중 매개 변수와 수렴조건은 표 7의 설계조건과 같다.

표 7. 설계조건

강 제품의 단위 무게(kg) 당 단가:	c_m (원/kg)	600
한 개소의 모멘트 연결 시 소요경비:	c_c (원/개소)	900,000
개체 수		500
교배확률		0.75
돌연변이 확률		0.001
재생산 확률		0.75
수렴기준	해의 변화가 없는 연속된 세대 수 : 5회	

3.2.2절에서 소개된 본 연구의 알고리즘에 따라 모든 기둥과 보의 연결부위에서 모멘트 연결의 존재를 이진수로 표현하고 연산을 수행함으로써, 모든 보-기둥 연결의 수($N=50$)로부터 선정된 모멘트 연결의 수(N_{rc})에 따른 구조물의 내의 모멘트 연결의 배치와 이에 따른 모든 부재에 최적 강 제품을 얻을 수 있다. 그리고 선정된 모멘트 연결의 수의 변화시키면서 매번 본 유전 알고리즘을 수행하여 총 경비를 계산함으로써 강 프레임 구조물의 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반 관계를 그림 5와 같이 나타내었다. 이로부터 최소 총 경비를 갖는 최적의 모멘트 연결의 수($N_{opt} = 10$)를 결정할 수가 있다. 보-기둥 간 부재 강결(모멘트 연결)의 배치는 그림 6과 같으며, 이때 부재단면과 목적함수인 총 경비함수의 변화율은 표 8, 9와 같다.

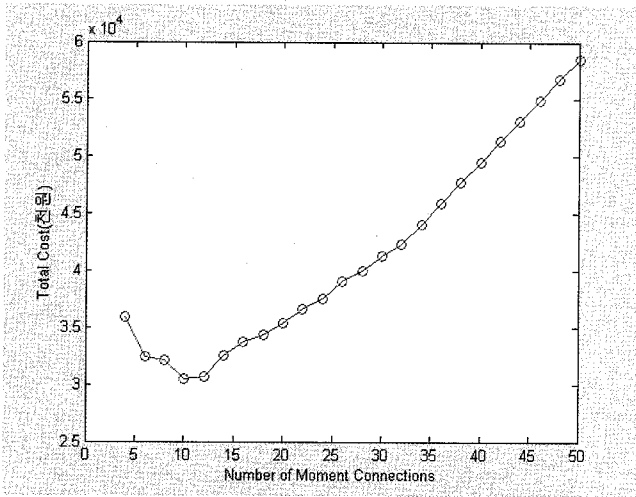


그림 5. 보-기둥간 모멘트 연결의 수의 변화에 따른 총 경비합수 변화

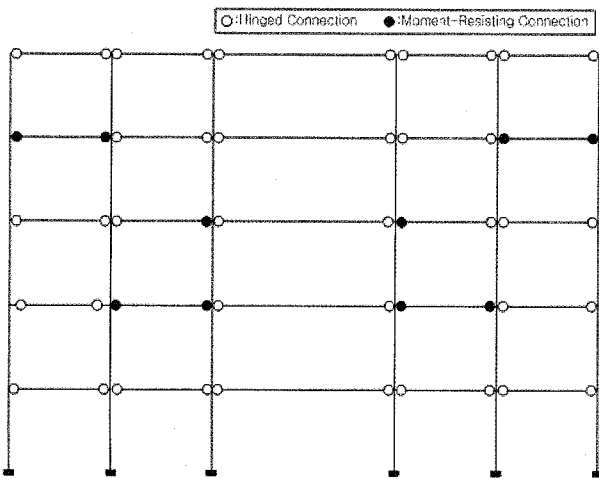


그림 6. 최적 모멘트 연결의 수($N_{opt}=10$)와 그 배치도

4.4 설계대안의 생성

위 4.3절에서 생성된 보-기둥간 각각의 소요 모멘트 연결의 수에 따른 최적 설계해들은 최적 단면뿐만 아니라 모든 보-기둥간 연결부위의 모멘트 연결의 존재 유무까지도 결정해 주는 유일한 최적해를 결정해줌으로써 실제 활용면에 있어서 다양한 설계조건에 따른 적합성에 많은 문제점을 야기할 수 있다. 즉, 이러한 유일한 최적 설계해를 기반으로 하여 실무 설계자들이 설계여유를 확보하고 설계에서 고려되지 못한 설계요소들을 감안한 최종 의사결정을 수행한다면 그 의사 결정에 많은 어려움이 따를 것이다. 이에 3.3절에서 소개된 본 연구의 설계 대안 시스템을 통해 유일한 설계해가 아닌, 최적설계해와 최대한 다르면서 유용한 설계대안들을 제시함으로써 이들의 의사결정을 지원할 수 있다. 본 연구의 설계대안의 생성 예로써는 보-기둥간 강결의 수가 최적의 모멘트 연결 수 ($N_{opt}=10$) 보다 많으면서 그 경비 증가는 상대적으로 작은

모멘트 연결의 수가 12인 경우를 통해 설계 대안을 생성하고 이들을 평가하고자 한다.

표 8. $N_{opt}=10$ 을 갖는 최적설계 해의 부재단면

강제품	부재번호
W14x193	1,2,11,12,21,22,31,32,41,42,51,52
W14x99	3,4,13,14,24,34,43,44,53,54
W14x120	23,33
W14x90	5,15,25,35,45,55
W12x22	6,16,36,46
W21x44	7,9,27,29,47,49
W21x55	8,18,28,38,48
W18x35	10,20,30,40,50
W18x40	17,37
W24x68	19,39
W16x31	26

표 9. $N_{opt}=10$ 을 갖는 최적설계 해의 목적함수의 감소율

1단계 최소중량설계 목적함수 값(천원)	2단계최적설계 목적함수 값(천원)	감소율(%)
58,529	30,495	47.9%

먼저 설계대안의 총 경비합수 값이 최적 설계해의 값과 비교 시 10%이상 증가하지 못하도록 하기위해 식(27)의 추가 제약조건의 경비승수 $k=1.1$ 을 사용하였다. 1단계와 2단계 최적화 과정을 통해 얻은 소요 모멘트 연결 12를 갖는 강프레임 구조물의 최적설계와 이를 이용한 설계 대안들의 부재단면은 표 10, 11, 12와 같다. 또한 소요 모멘트 연결 12를 갖는 강프레임 구조물의 최적설계의 목적함수 감소율과 최적 설계해와 설계대안들의 목적함수 비교는 표 13, 14와 같으며, 각 모멘트 연결의 배치는 그림 7, 8, 9와 같다.

표 10. $N_{rc}=12$ 를 갖는 최적설계 해의 부재단면

강제품	부재번호
W14x193	1,2,11,12,21,22,31,32,41,42,51,52
W14x82	3,4,5,13,14,15,23,24,25,33,34,35,43,44,45,53,54,55
W21x44	8,18,19,28,29,38,39,48
W12x22	6,16,36,46
W18x35	7,17,37,47
W24x55	9,39
W16x31	26
W18x40	27
W16x40	10,20,30,40,50

표 11. $N_{rc}=12$ 를 갖는 설계대안(I)의 부재단면

강제품	부재번호
W14x193	1,2,11,12,21,22,31,32,41,42,51,52
W14x120	3,4,13,14,23,24,33,34,43,44,53,54
W14x99	5,15,25,35,45,55
W14x22	6,16,36,46
W21x48	7,9,17,29,37,47,49
W21x55	8,18,38,48
W18x35	10,20,26,30,40,50
W24x68	19,39
W24x62	27
W24x55	28

표 12. $N_{rc}=12$ 를 갖는 설계대안(II)의 부재단면

강제품	부재번호
W14x193	1,2,11,12,21,22,31,32,41,42,51,52
W14x82	3,4,5,13,14,15,24,25,34,35,43,44,45,53,54,55
W14x99	23,33
W12x22	6,16,36,46
W18x35	7,17,37,47
W21x44	8,18,28,38,48
W21x48	9,29,49
W18x40	10,20,27,30,40,50
W24x62	19,39
W16x32	26

표 13. $N_{rc}=12$ 를 갖는 최적설계 해의 목적함수의 감소율

1단계 최소중량설계 목적함수 값(천원)	2단계최적설계 목적함수 값(천원)	감소율(%)
58,529	30,693	47.5%

표 14. $N_{rc}=12$ 를 갖는 최적설계와 설계대안의 목적함수(천원) 비교

최적설계	설계대안(I)	설계 대안(II)
30,693	33,613	30,884

4.5 결과 비교 및 분석

앞 절에서 이루어진 5층 5경간 강프레임 구조물의 최적설계 및 설계대안 생성 결과를 다음과 같이 비교 분석하였다.

- ① 실무에서 주로 사용되는 강 제품들을 대상으로 본 연구의 1단계 최소 중량 설계를 수행함으로써, 2단계 유전알고리

즘을 통한 최소 경비 설계에서 설계변수의 수를 줄이면서 유용한 초기해를 용이하게 제공할 수 있었다.

- ② 본 연구의 모멘트 연결의 수를 고려한 2단계 최적설계를 통해 표 9와 같이 최소중량설계에 의한 결과보다 대략 48% 더 총 경비를 줄일 수 있었다.
- ③ 사용되는 강 제품을 나타내는 설계변수와, 보-기둥 간 모멘트 연결의 유무를 나타내는 이진수 설계변수로 구성된 두 가지 타입의 설계변수를 사용함으로써, 표 8과 그림 6와 같은 모든 부재의 최적의 강제품의 결정뿐만 아니라 모든 보-기둥의 모멘트 연결의 유무에 따른 배치도 확인할 수 있었다.

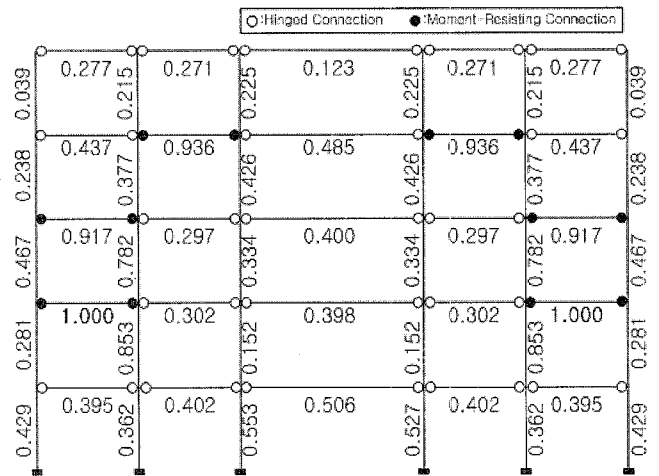


그림 7. $N_{rc}=12$ 최적설계해의 모멘트 연결 배치도

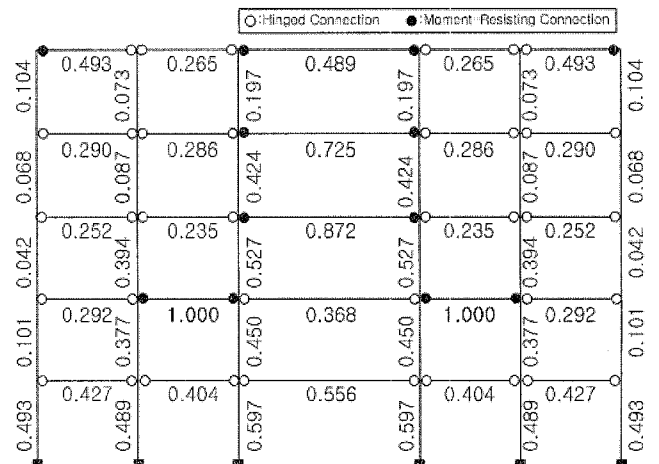


그림 8. $N_{rc}=12$ 설계대안(I)의 모멘트 연결 배치도

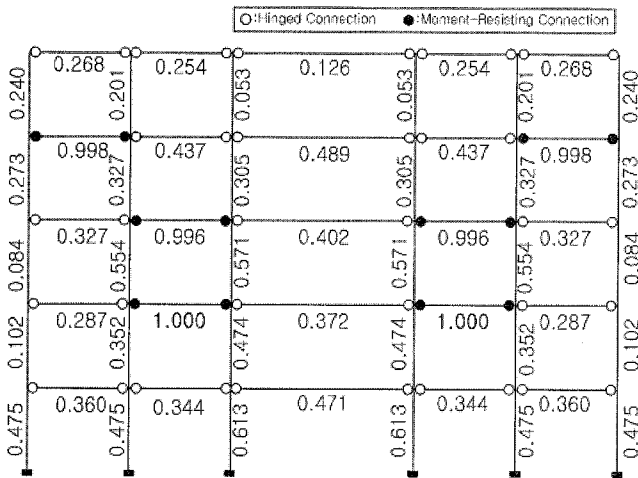


그림 9. $N_{rc}=12$ 설계대안(II)의 모멘트 연결 배치도

- ④ 선정된 모멘트 연결의 수를 달리하며 본 연구의 최적설계 알고리즘을 반복해서 수행함으로써, 그림5와 같이 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계를 나타낼 수 있었으며 이를 통해 최적의 모멘트 연결의 수를 결정할 수가 있었다. 이러한 상반관계를 살펴보면, 모멘트 연결의 수를 최적의 모멘트 연결의 수(N_{opt}) 이상으로 선정 시 총 경비는 단지 하나의 모멘트 연결을 제작하는데 소요되는 경비에 비례하여 증가됨을 알 수 있으며, 이와는 반대로 모멘트 연결의 수가 최적의 모멘트 연결의 수(N_{opt}) 이하로 선정 시 총 경비는 구조물의 안정성을 위해 요구되어지는 모멘트 연결의 수의 부족으로 인하여 부재단면의 증가로 인한 재료비의 상승으로 이어짐을 알 수가 있다.
- ⑤ 최적설계해와 최대한 다르면서 유용한 설계대안을 제시할 수 있는 본 연구의 설계대안 생성 알고리즘을, 설계 대안 생성 예로써, 표 10, 13 및 그림 7에 나타난 소요 모멘트 연결의 수가 12인 최적설계를 대상으로 수행하여, 총 경비증가가 10%내의 설계대안들을 표 11, 12와 그림 8, 9 및 표 14에서 보이는 바와 같이 생성하였다.
- ⑥ 본 설계시스템에 의해 생성된 설계대안들이 실제 실무 설계자들의 전문적인 경험과 지식에 근거한 평가에 따라 실제로 최종설계를 위한 의사결정에 도움이 될 수 있음을 몇 가지 예를 통해 나타낼 수 있다.
 - ㉠ 소요 모멘트연결의 수가 12인 최적설계와 이를 대상으로 생성된 설계대안(I), (II)의 사용되는 강재품을 크기를 비교 해보면 표 10, 11, 12에서 나타난 바와 같이 최적설계해의 경우 모멘트 연결을 갖는 가장 큰 보의 크기는 W18x35이며, 설계대안(I)은 W24x68이며, 설계대안(II)는 W24x62이다. 즉, 본 설계에서 보-기둥 간 모멘트 연결의 소요경비는 모두 일정한 것으로 가정하였으나 실제로는 사용되는 보와 기둥의 제품의 크기

에 영향을 받는다. 따라서 사용되어지는 가장 큰 보의 크기 또한 설계자들이 중시하는 설계요소로서 최종 설계를 위한 의사결정에 영향을 미칠 수 있다.

- ㉡ 소요 모멘트연결의 수가 12인 최적설계와 이를 대상으로 생성된 설계대안(I), (II)의 모멘트연결의 배치도 그림 6, 7, 8을 살펴보면 최적설계의 경우 주로 바깥쪽 경간에 모멘트 연결이 요구되는 반면에 설계대안(I)의 경우 주로 안쪽경간에 모멘트연결이 요구된다. 즉, 시공의 용이성 측면에서 살펴보면 대도심과 같이 인접된 건물들과 많은 교통량으로 인해 최적설계와 같은 바깥쪽 모멘트연결을 위한 현장 용접이나 볼트 체결과 같은 작업 수행 시 크레인 배치등과 같은 시공의 어려움이 예상되는 반면에 설계대안(I)의 경우는 매우 유리하다. 따라서 모멘트연결의 배치 역시 중을 미칠 수 있다.
- ⑦ 최적설계 해와 설계대안(I), (II)의 횡방향하중의 저항능력을 확인하기위하여 표4의 하중조건의 풍하중을 증가시키면서 이를 확인한 결과 그림 7, 8, 9에서 각 부재의 좌측과 아래에 보-기둥 상관관계 값을 표기한 바와 같이 최적설계 해는 풍하중을 95% 증가 시에 9번, 49번 부재에서, 설계대안(I)은 123% 증가 시에, 설계대안(II)은 117% 증가 시에 19번, 39번 부재에서 파괴에 이르렀다. 즉, 건설현장의 환경에 따라 최종설계를 위한 의사 결정 과정 중 실무설계자들은 설계여유 확보 차원에서 풍하중과 같은 횡방향하중에 대한 저항능력을 중요 설계요소로 참고하여 표 14에서 나타난 각각의 총 경비와의 상대적인 비교를 통해 최종 설계 결정을 수행할 수 있을 것이다.
- ⑦ 본 연구의 의사결정 지원시스템을 통해 다양한 최적 설계해를 대상으로 다양한 설계대안을 생성할 수가 있으며, 예를 통해 이들 각각의 설계대안들은 설계자와 기술자의 전문적인 지식과 경험에 의해 재평가되어 최종 설계를 위한 의사 결정에 도움을 줄 수 있음을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 강 프레임구조물의 최종설계를 위한 의사결정 지원시스템을 개발하고자, 재료비 외에 보-기둥 간 모멘트 연결비를 포함한 경비함수를 가지고, 유전알고리즘에 기초한 최적화 기법을 통해 최적설계 해를 획득하고 이를 이용한 변환된 최적화 문제형식으로 설계대안을 생성하는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구의 시스템을 실제해중을 고려한 다층 다 경간 강 프레임 구조물을 대상으로 수행한 결과의 비교분석을 통하여 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최근의 건설환경을 인식하고 재료비외에 많은 노무비를 요구하는 부재연결을 경비함수에 고려하고 부재단면 외에 설보-기둥간 강결의 유무를 설계변수에 고려함으로써 최소중량설계에 의한 결과보다 총 경비를 더 줄일 수 있었으며, 모든 부재를 위한 최적의 강재품의 결정뿐만 아니라 모든 보-기둥간 모멘트 연결의 배치도 확인할 수 있었다. 또한 선정된 모멘트 연결의 수를 달리하며 본 연구의 최적설계 알고리즘을 반복해서 수행함으로써, 모멘트 연결의 수와 총경비와의 상반관계를 구현하였다. 이로써 설계자들에게 구조물의 안정성과 경제성에 관한 명확한 이해를 가능하게 해 줄 수 있다고 판단된다.
- (2) 최적설계해에 만족하지 않고 이를 이용한 변환된 최적화문 제형식을 수립하여 최적설계해와 최대한 다르면서 유용한 설계대안을 생성하였다. 생성된 각 설계대안들은 실무 설계자의 지식 및 경험에 의해 평가되어 최종설계를 위한 의사결정을 지원하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 예를 통해 보여줌으로써 본 연구의 설계시스템은 실용적이며 효과적이라고 사료된다.
- (3) 추후과제로써 건설환경의 변화에 대한 관심을 통해 총 경비의 구성을 명확히 이해하여 모든 재료비와 제작비 및 노무비를 포함하는 경비함수를 수립하고, 기존의 연구에서 다루어지지 않았으나 실무에서 중요한 설계요소로 작용하는 다양한 요소를 설계변수화하여 최적설계를 수행하고 이로부터 설계대안을 획득하는 연구가 기대됩니다.

참 고 문 헌

김승억, 마상수(2003) 유전자 알고리즘을 이용한 비선형 비탄성 최적설계, 대한토목학회 논문집, Vol.23, No.5A, pp.841-850

김창성, 마상수, 최세휴, 김승억(2002) 비선형 해석을 이용한 강 뼈대구조물의 자동화설계 한국강구조학회 논문집 Vol.14 No.2 pp. 339-348

박순웅, 박문호, 권민호, 장준호(2002) 패널영역의 변형을 고려한 강뼈대 구조물의 이산화 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, Vol.15, No.2, pp. 315-327

장준호, 박문호, 이상광(2000) 고등해석을 이용한 강뼈대구조물의 이산화 최적설계, 대한토목학회 논문집, Vol.20, No.1-A, pp. 87-95

최세휴, 박문호, 송재호, 임청권 (2003) 접합부의 비선형 거동을 고려한 강뼈대 구조물의 고등해석과 최적설계, 한국강

구조학회논문집, Vol.15, No.6, pp. 661-672

AISC(2001) Manual of Steel Construction-Load Resistance Factor Design. AISC 3rd edition.

Camp C.V., Bichon B.J. and Stovall S.P.(2005) Design of Steel Frames Using Ant Colony Optimization. *J. Struct. Engng.* ASCE, Vol.131(3), pp.369-379

Carter C.J. , Murray T.M. and Thornton W.A(2000) Cost-Effective Steel Building Design. *Prog. Struct. Engng. Mater*, Vol.2, pp.16-25

Erbatur F., Hasancebi O., Tutuncu I., and Kilic H. (2000) Optimal Design of Planar and space structure with Genetic Algorithms. *Comput. Struct*, Vol.75(2), pp.209-224

Grierson D. and Lee W.(1984) Optimal Synthesis of Steel Frameworks Using Standard Sections. *J. Struct. Mech*, Vol.12(3), pp.335-370

Hanger K. and Balling R.(1988) New Approach for Discrete structural Optimization. *J. Struct. Eng*, Vol.114(5), pp.1120-1134

Isenberg J., Pereyra V. and Lawver D.(2002) Optimal Design of Steel Frame Structures. *Applied Numerical Mathematics* Vol.40 pp.59-71

Kameshki E.S. and Saka M.P.(2001) Optimum Design of Nonlinear Steel Frames with Semi-Rigid Connections Using a Genetic Algorithms. *Comput. Struct*, Vol.79(17), pp.1593-1604

Pereyra V., Lawver D. and Isenberg J.(2003) An Algorithm for Optimal Design of Steel Frame Structures. *Applied Numerical Mathematics*, Vol.47, pp.503-514.

Simoes L.M.C.(1996) Optimization of Frames with Semi-Rigid Connections. *Comput. Struct*, Vol60(4), pp.531-539

Xu. L., Gong Y. and Grierson D.E(2006) Seismic Design Optimization of Steel Building Frameworks. *J. Struct. Engng.* ASCE, Vol.132(2), pp.277-286

Xu L. and Grierson D.E.(1993) Computer-Automated Design of Semi-Rigid Steel Frameworks. *J. Struct. Engng.* ASCE, Vol.119(6), pp.1740-1760

Yun Y.M. and Kim B.H.(2005) Optimum Design of Plane Steel Frame Structures Using Second-Order Inelastic Analysis and a Genetic Algorithm. *J. Struct, Engng.* ASCE, Vol.131(12), pp.1820-1831

(접수일자 : 2006. 6. 15 / 심사일 2006. 7. 3 / 심사완료일 2007. 1. 10)