

강 뼈대구조물의 총 경비와 부재연결과의 상반관계에 관한 연구

Computational Approach for the Trade-Off Study

between the Total Cost and the Member Connections in Steel Frames

최 병 한^{1),†} . 임 정 환²⁾

Choi, Byoung Han . Lim, Jung Hwan

요 약 : 지난 10년간 건설 환경에서 노무비는 재료비에 대해 상대적으로 계속해서 증가하고 있다. 따라서 강구조물의 최적 설계를 위해 널리 쓰이고 있는 최소중량설계는 더 이상 최소경비설계를 의미하지 못한다. 최근의 강 구조물의 제작 시 재료비 외에 부재연결에 소요되는 경비가 실제로 총 제작비에 커다란 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 대부분의 연구가 최소 중량설계나 구조물의 고등해석에만 이루어지고 있다. 따라서 본 연구는 횡 방향 하중에 효과적으로 저항하도록 보와 기둥이 모멘트 연결된 강 뼈대 구조물을 대상으로 안정성에 문제가 없이 경비절감에 효과적인 설계를 위해 재료비뿐만 아니라 제작비 및 현장에서 가설 시 부재연결에 소요되는 경비를 포함하는 최소 경비 설계를 수행하고자 한다. 하중저항계수설계법에 따른 전단과 처짐 및 보-기둥 상관관계식을 포함하는 비선형 해석과정과 유전알고리즘을 바탕으로 한 최적화 알고리즘을 결합하여 모멘트 부재연결의 수를 줄이고 또한 효과적인 배치를 수행함으로써 최적 설계 해 및 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반 관계를 나타내고 이로부터 최적의 모멘트 연결의 수 및 그 배치를 구하였다. 현실적인 하중조건을 고려한 수치 예를 통해 본 연구의 적용성과 효율성을 나타내었다.

ABSTRACT : Over the past decade, labor costs have increased relative to the cost of material hardware according to analysts in the construction industry. Therefore, the minimum weight design, which has been widely adopted in the literature for the optimal design of steel structures, is no longer the most economical construction approach. Presently, although connection-related costs is crucial in determining the most cost-effective steel structures, most studies on this subject focused on minimum-weight design or engaged in higher analysis. Therefore, in this study, we proposed a fabrication scheme for the most cost-effective moment-resisting steel frame structures that resist lateral loads without compromising overall stability. The proposed approach considers the cost of steel products, fabrication, and connections within the design process. The optimal design considered construction realities, with the optimal trade-off between the number of moment connections and total cost was achieved by reducing the number of moment connections and rearranging them using the combination of analysis that includes shear, displacement and interaction value based on the LRFD code and optimization scheme based on genetic algorithms. In this study, we have shown the applicability and efficiency in the examples that considered actual loading conditions.

핵심용어 : 건설환경, 상반관계, 강 뼈대 구조물, 모멘트 연결, 유전알고리즘

KEYWORDS : Construction-Realities, Trade-Off, Steel Frame Structures, Moment Connections, Genetic Algorithms

1. 서론

오늘날 강구조물의 경제적이고 효율적인 설계 및 시공을 위해 고도의 CAE/CAD 시스템의 출현이 가능해져 실무에서 이미 사용되고 있으며, 더 나아가 이러한 전산프로그램의 활용시

장의 우위를 선점하기 위하여 보다 정밀한 고등해석과 보다 효율적인 최적설계기법의 적용을 시도하고 있다. 그러나 신소재의 개발과 급격히 증가하는 시공경비와 같은 급변하는 건설 환경의 도전에 대다수의 연구들이 강구조물의 실무현장에서 발견되는 문제점에 미처 대응하지 못하는 점도 나타나고 있다. 이

1) 교신저자, 정회원, North Carolina State Univ. Postdoc. Researcher, 공학박사
(Tel. 1-936-263-6865, E-mail: han1020@hotmail.com)

2) 정회원, 전주공업대학 토목환경과 교수, 공학박사

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

에 본 연구에서는 강구조물의 건설경비의 급격한 증가로 인한 건설 환경의 문제점에 관심을 갖고 직접적으로 접근하고자 하는 연구를 수행하고자 한다.

국내외에서 이미 많은 연구가 강구조물의 건설경비에 관심을 갖고 다양한 최적설계 기법을 적용하여 연구를 수행하였으나 이들 대부분 최소 중량설계와 같은 전형적인 최적설계에 관한 연구이며, (장준호 등, 2000; 김창성 등, 2002; 박문호 등, 2002; 김승억 등, 2003; 최세후 등, 2003; Grierson 등, 1984; Hager 등, 1988; Saka 등, 1998; Erbatur 등, 2000; Kameshki 등, 2001; Isenberg 등, 2002; Pereyra 등, 2003; Yun 등, 2005; Camp 등, 2005; Xu 등, 2006) 이러한 최소중량 설계는 실제 설계에 있어 종종 실 소요경비를 반영하지 못하게 된다. 그 이유로는 건설현장에서 강구조물의 총 소요 경비는 단순히 사용되어진 강재의 재료비만을 포함하지 않으며 다양하고 복잡한 설계문제를 포함하고 있기 때문이다. 이에 관련하여 Nucor(1999)는 강구조물의 설계에 있어 부재별 단면 타입과 강도에 따른 단가의 다양성으로 인하여 실제 사용되어지는 총 강재의 사용량을 평가하는데 재료의 총 중량에 의한 방법보다 총 경비에 의한 방법이 보다 더 바람직하다고 하였다.

최근 10여년간 건설환경의 변화에서 대두되는 바로는 노무비의 증가율이 재료비의 증가율보다 매우 빠르게 높아지고 있다는 것이다. Carter 등(2000)은 이미 2000년도에 그의 연구에서 강 구조물의 건설과 관련된 노무비는 총 경비의 60%를 차지한다고 경고했으며 이러한 노무비 중 절반은 공장의 제작비에 소요되고 나머지 절반은 현장에서의 가설 시 소요된다고 하였다.

따라서 더 이상 최소중량설계는 구조공학의 궁극적인 목적인 최소 경비설계를 의미하지 못하며, 또한 대다수의 기존의 연구들 역시 고인건비 시대에 처한 상황에서 인건비 절약에 관한 설계방안의 명확한 해는 제공하지 못했다.

이러한 건설 환경의 변화에 부응하여 강구조물의 설계를 위한 강재의 재료비 외, 강 제품의 제작비와 현장에서 구조물의 가설비등을 포함하는 세밀한 경비함수를 고려한 최적설계가 요구되고 있으나 재료비 외의 경비함수의 각 경비 단가를 구하기는 결코 쉽지 않은 문제이다. 이러한 제작과 가설에 요구되는 경비를 결정하는 데에는 많은 결정요인의 수반되며 특히 지역에 따라 각기 다른 단가를 나타내며, 같은 지역이라도 공장의 자동화 정도, 사용 장비의 종류와 수 및 기술자의 숙련도에 따라 그 값을 달리한다. 이에 Fern 등 (1990)과 Jarmai 등 (1997, 1999)은 강 제품의 제작비를 효율적으로 결정하고자 각 공정별 소요시간을 기본으로 제작에 소요되는 경비를 산출하는 방법을 고안하였으며 실제로 소요시간은 위에서 언급한

요인들에 따라 값을 달리함을 보였다.

강구조물의 설계에 있어서 이상과 같은 경비함수의 사용과 더불어 주목할 만한 연구로는 Xu 등(1993)과 Simoes (1996)의 연구를 들 수 있다. 비록 이들의 연구가 최소중량설계를 목적함수로 사용하였지만 단순한 중량 외에 목적함수로 연결강도에 따른 부재연결경비를 고려하였다.

본 연구의 대상 강 구조물은 부재연결이 모두 강결(Rigid Connection)된 강 뼈대 구조물이다. 강 뼈대 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. 이러한 강 뼈대 구조물의 제작과정에서 높은 시공경비의 소요의 주된 요인으로는 강 재료비와 제작비 외에 현장에서 가설 시 소요되는 높은 인건비를 들 수 있다. 특히 현장에서 가설을 위하여 이루어지는 용접과 같은 부재 연결에 소요되는 가설경비는 실제 강 뼈대 구조물의 시공 소요경비의 많은 부분을 차지한다.

또한 최적설계에서 주 목적은 총 소요경비의 최소화이지만 실무에서는 종종 엔지니어의 최종설계를 위한 의사결정 과정에서 설계 여유와 같은 요인이 중시된다. 강 뼈대구조물의 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 재료비와 제작비의 절감뿐만 아니라 부재 간 강결의 수 및 배치는 현실적인 설계과정에서 간과할 수 없음을 의미한다.

실무 설계자 및 현장의 기술자들의 경험과 자문을 통해 강 뼈대 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 연결수의 감소로 인한 부재단면의 증가로 말미암은 경비증가는 위에서 언급한 경비 절감량에 비해 매우 적음을 알 수 있다.

이상에서 언급한 바에 따라 본 연구에서는 강 뼈대구조물의 최소 경비 설계를 위하여 재료비 외에 강 제품 제작과 보-기둥 간 모멘트 연결을 이용한 강결 시 요구되는 경비를 포함한 총 경비함수를 고려하고자한다 또한 실제로 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 유전알고리즘에 기초한 최적화 기법을 사용한 본 연구의 설계시스템을 이용하여 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계(Trade-Off)를 확연히 나타내하고자 하며 이를 통해 최적의 보-기둥 간 강결의 수 및 그 배치를 나타냄으로써 재료비와 노무비의 증감량에 따른 건설 환경의 변화에서 요구

되는 설계를 수행하고자 한다.

2. 연구내용

본 연구의 대상 강 뼈대구조물의 보-기둥 간 부재연결은 전-강결(Fully-Rigid Connection)인 모멘트 연결(Moment-Resisting Connection)이라고 가정한다. 이러한 모멘트 연결에 의한 뼈대구조물은 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 경비합수는 강 재료비와 강 제품 제작에 소요되는 제작비 및 보-기둥 간 부재 강결에 소요되는 경비 향으로 구성하였다.

$$C_T = C_m + C_f + C_c \quad (1)$$

여기서,

C_T : 총 경비

C_m : 강재 재료비

C_f : 공장에서 강 제품 제작에 소요되는 경비

C_c : 보-기둥 간 부재 강결에 소요되는 경비

강재 재료비는 다음과 같으며,

$$C_m = c_m \rho V \quad (2)$$

여기서,

c_m : 재료비 단가(500~1000원/kg)

ρ : 단위 중량

V : 구조물의 체적

보 및 기둥의 제작에 소요되는 경비는 서론에서 기술한 바와 같은 Jarmai 등(1999)의 연구 방법에 따라 다음과 같이 결정하였다.

$$C_f = c_f \sum_i^n T_i \quad (3)$$

여기서,

c_f : 제품 제작에 소요되는 시간별 제작 단가
(0~1000원/min)

T_i : I번째 제작공정의 제작시간

Jarmai 등(1999)의 연구에서는 제작에 소요되는 단가(c_f)를 재료비 단가(c_m)과의 비율로부터 결정하였다. 제작 기술 수준에 따라 지역별로 이 비율을 표 1과 같이 분류하여 이를 이용하였다.

표 1. 재료비 단가와 제작비 단가의 비율

지역	미국, 일본	서부유럽	개발도상국
비율(c_f/c_m)	2.0	1.5, 1.0	0.5

보-기둥 간 부재 강결의 소요 경비로는,

$$C_c = c_c N_{rc} \quad (4)$$

여기서,

c_c : 한 개소 보-기둥 간 모멘트 연결의 제작비와 시공에 소요되는 단가.

N_{rc} : 요구되는 보-기둥 간 모멘트 연결의 수.

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

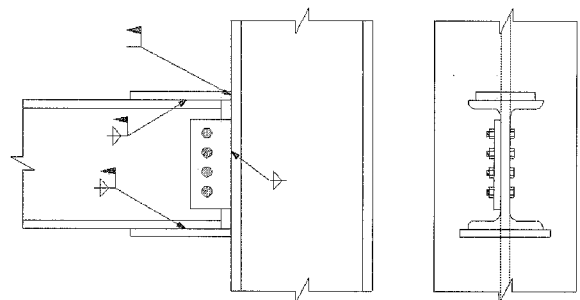


그림 1. 강판을 이용한 플랜지 용접

기존의 연구에서는 단지 뼈대 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.

즉, 본 연구에서는 앞에서 제시한 해석과정과 유전알고리즘에 기초한 최적설계와의 통합된 시스템에 의해 실질적인 경비함수가 감소하는 한도 내에서 모멘트 연결을 힌지 연결로 대체하고 필요하면 단면적이 보다 큰 제품으로 대체하는 방법으로 모멘트 부재연결의 수를 변화시키고 효율적인 배치를 나타내고자 한다. 즉, 먼저 최소 중량설계를 실시한 후 이로부터 얻어진 설계값을 초기 설계값하여 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 본 설계시스템을 반복적으로 수행하여 모멘트 연결의 수와 총경비와의 상반관계를 구현하고 이로부터 최적의 모멘트 연결의 수를 결정함으로써 실무에서 요구하는 강 뼈대구조물의 최소경비설계를 이루고자한다.

이와 같이 구성된 본 연구의 설계시스템의 적용성과 효과를 실제하중을 고려한 다층 다 경간 강 뼈대 구조물을 대상으로 살펴보고자 한다.

3. 강 뼈대 구조물의 설계를 위한 문제형성

3.1 최적설계 문제 형성

다층 다 경간 강 뼈대 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 총기둥과 보의 연결 수는 2(S x B)이다. 또한 총 보와 기둥의 수는 (2SB+S) 이다. 예로써, 그림 2의 2층 2경간 구조물의 경우 S=2, B=2, 총 보의 수는 4, 총 연결의 수는 8 이며, 총 보와 기둥의 수는 10이 된다.

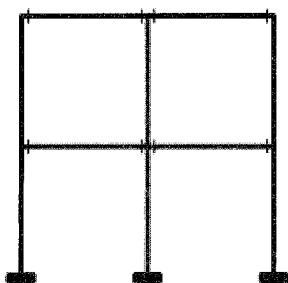


그림 2. 2층 2경간 강뼈대구조물의 부재연결

본 연구의 설계변수로써는 먼저 사용하는 강 제품을 나타내는 P_i 로 모든 부재에 대하여 다음과 같이 표현되며

$$P_i = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{(2SB+S)}] \quad (5)$$

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(6)과 같다.

$$X_j = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2(S \times B)}] \quad (6)$$

본 연구의 경비함수로는,

$$C_T = c_m \sum_{i=1}^{(2SB+S)} W_{P_i} L_i + c_f \sum_i^n T_i + c_c \sum_{j=1}^{2(S \times B)} x_j \quad (7)$$

여기서,

C_T : 총 경비

c_m : 강재의 단위 무게 당 단가(원/kg)

c_c : 한 개소의 모멘트 연결 시 소요경비(천원/개소)

W_{P_i} : 강 제품 P_i 의 단위 길이 당 무게(kg)

L_i : 부재 i의 길이(m)

c_f : 제품 제작에 소요되는 시간별 제작 단가(원/min)

T_i : I번째 제작항목의 제작시간

(세부 사항은 Jarmai 등, (1999) 문헌 참조)

T_1 : 부재(복부와 플렌지)의 용접소요시간(min)

$$= c_1 \Theta_d \sqrt{n \rho V} + 1.3 \sum_i c_{2i} a_w^n L_{wi} \quad (8)$$

c_1 : 1min/√kg

Θ_d : 작업의 난이도 계수(1.0~4.0)

n : 조립될 강판의 수

ρ : 강판의 단위중량(kg/mm³)

V : 강판의 체적(mm³)

$10^3 c_{2i} a_w^n$: 0.7889 a_w^2 (셴드 메탈 아크 용접시)

a_w : 0.5 t_w (필렛 용접 시)

t_w : 복부의 두께(mm)
 L_w : $4L_{el}$
 L_{el} : 강판의 길이(mm)

T_2 : 도장에 소요되는 시간(min)

$$= \Theta_{dp} (a_{gc} + a_{tc}) A_s \quad (9)$$

Θ_{dp} : 작업의 난이도 계수(1, 2 또는 3)
 a_{gc} : $3 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$ (그라운드 코팅)
 a_{tc} : $4.15 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$ (탑 코팅)
 A_s : 강판의 면적(mm^2)

T_3 : 강판의 절단 및 그라인딩에 소요되는 시간(min)

$$= \sum_i c_3 t_i^n L_{ci} \quad (10)$$

$10^3 c_3 t^n$: 1.1388 $t^{0.25}$
 t : t_f or t_w (mm) 플렌지나 복부의 두께
 L_c : 강판의 절단 길이(mm)

T_4 : 강판의 면 청소 및 샌드 스프레이 등에 소요되는 시간(min)

$$= \Theta_{ds} a_{sp} A_s \quad (11)$$

Θ_{ds} : 작업의 난이도 계수
 a_{sp} : $3 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$
 A_s : 강판의 면적(mm^2)

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 위배 시 벌칙을 부과함으로써 선정된 모멘트 연결의 수를 유지하도록 하였다.

강도 제약조건으로 강 뼈대 구조물을 구성하는 모든 부재들은 설계코드 하중저항계수설계편의 다음과 같은 상관관계식을 모든 하중조건에 따라 만족해야한다.

$\frac{P_u}{P_r} < 0.2$ 인 경우

$$\left(\frac{P_u}{2.0P_r} + \frac{M_u}{M_r} \right) - 1.0 \leq 0 \quad (12)$$

$\frac{P_u}{P_r} \geq 0.2$ 인 경우

$$\left(\frac{P_u}{P_r} + \frac{8 M_u}{9 M_r} \right) - 1.0 \leq 0 \quad (13)$$

여기서,

P_u : 극한 축 하중

$$P_r = \Phi P_n \begin{cases} P_n : \text{공칭축강도} \\ \text{인장시} & \text{식 (12)에서 } \Phi : 0.75 \\ & \text{식 (13)에서 } \Phi : 0.9 \\ \text{압축시} & \text{식 (12)(13)에서 } \Phi : 0.85 \end{cases}$$

M_u : 극한 휨 모멘트

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

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.

$$V_u - \phi_n V_n \leq 0 \quad (14)$$

여기서,

V_u : 극한 전단력

V_n : 공칭 전단강도로써 다음과 같다.

$\frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}}$ 인 경우

$$V_n = 0.6 f_{yw} A_w \quad (15)$$

$2.45 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}} < \frac{h}{t_w} \leq 3.07 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ 인 경우

$$V_n = 0.6 f_{yw} A_w \left[\frac{2.45 \sqrt{E/f_{yw}}}{h/t_w} \right] \quad (16)$$

$3.07 \sqrt{\frac{E}{f_{yw}}} < \frac{h}{t_w} < 260$ 인 경우

$$V_n = A_w \left[\frac{4.52 E}{(h/t_w)^2} \right] \quad (17)$$

ϕ_n : 0.90

f_{yw} : 복부의 항복강도

- A_w : 복부의 단면적
- h : 상 하부 플랜지 사이 거리
- E : 탄성계수

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

$$\Delta - L/400 \leq 0 \quad (18)$$

- 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.

$$A_c \geq A_{above} \quad (19)$$

- 여기서,
- A_c : 임의 층의 기둥의 단면적
- A_{above} : 임의 층 위 층의 기둥의 단면적

3.2 최적설계 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 뼈대 구조물을 설계하고자 모든 연결이 모멘트 연결이라 가정하고 모든 부재의 강 제품을 결정한다. 두 번째 단계는 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상관관계를 나타내기 위하여 앞의 단계에서 얻어진 최소 중량 설계의 해를 초기해로 하며, 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 본 설계 시스템의 유전알고리즘을 매번 구동한다. 이때 각 설계시스템의 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 유용해로 바뀌게 된다.

3.2.1 1단계 : 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 순서도와 요약설명은 아래와 같다.

- 1단계 : 강 뼈대 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 위배되는 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 합당하는 강 제품을 찾아 해당 층의 보와 기둥에 부여한다.

$$\delta I = \frac{\Delta_u - \Delta}{\Delta} I(P_i) \quad (20)$$

- 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

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

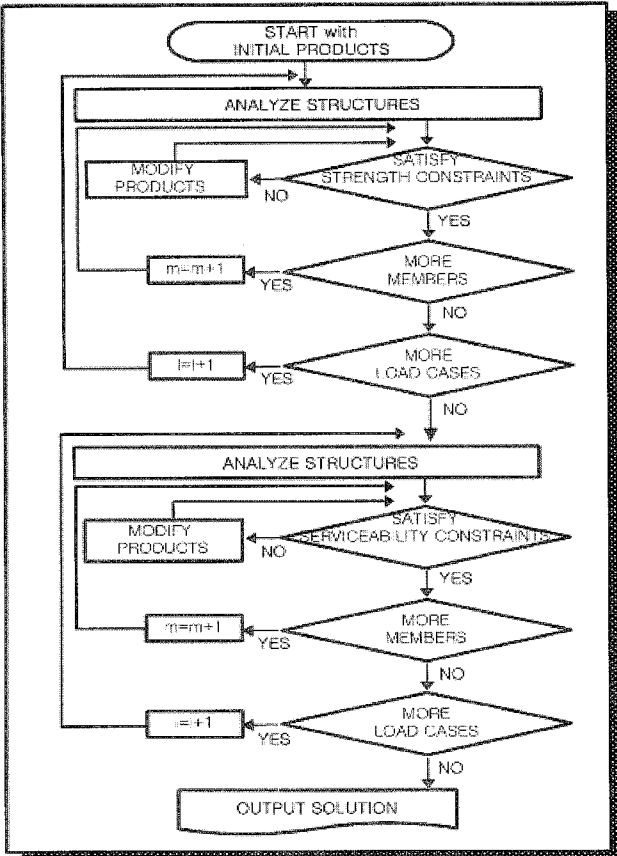


그림 3. 최소중량 설계 알고리즘의 순서도

3.2.2 2단계 : 최소 경비 설계를 위한 보-기둥 간 모멘트 연결의 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.

본 단계의 설계변수로는 보와 기둥간의 연결부위에 모멘트 연결의 유무를 나타내는 것으로써 앞에서 언급한 식 (6)과 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.

$$F = -(C_T + P_s + P_d + P_c) \quad (21)$$

여기서,

F : 적합함수

C_T : 총 경비함수

P_s : 강도 제약조건의 위배에 대한 벌칙함수

$$P_s = \alpha \sum_{i=0}^{2SB+S} g_{s_i} \quad (22)$$

P_d : 사용성 제약조건의 위배에 대한 벌칙함수

$$P_d = \beta \sum_{i=0}^{2SB+S} g_{d_i} \quad (23)$$

P_c : 모멘트 연결의 수에 대한 벌칙함수

$$P_c = \gamma \left| \sum_{i=1}^{2(SXB)} x_i - N_{rc} \right| \quad (24)$$

α, β, γ : 벌칙상수 = 1,000,000

g_{s_i} : i 번째 부재의 강도제약조건의 위배

g_{d_i} : i 번째 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.

$$X_i = \begin{cases} 1 & \forall i \in C \\ 0 & \forall i \notin C \end{cases} \quad (25)$$

여기서,

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_{rc}}\} \quad (26)$$

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 시스템을 활용하여 선정된 모멘트 연결의 수에 따른 총 경비의 경감 및 그 연결의 배치를 구할 수 있다. 또한 모멘트 연결의 수의 변화에 따라 본 시스템을 반복수행 함으로써 총 경비와 모멘트 연결의 수와의 상관관계를 규명하고 이를 통해 최적의 모멘트 연결의 수를 결정할 수 있다. 이와 같은 본 연구를 통해 보다 현실적인 강 뼈대 구조물의 최적설계를 이루었다.

4. 다층 다경간 강 뼈대구조물 최소경비 설계

본 연구 설계 시스템의 적용성과 효율성을 평가하기 위하여 실제 하중조건하에 그림 4와 같은 다층 다경간 강뼈대 구조물을 대상으로 본 연구의 설계시스템을 적용하고자 한다. 이를 위해 1단계 최소중량설계를 통해 설계 초기해를 결정하고 2단계 유전알고리즘을 통해 본연구의 중심인 모멘트연결의 수와 총경비와의 상관관계를 규명하고 최적의 모멘트 연결의 수와 그 배치를 나타내고자 한다.

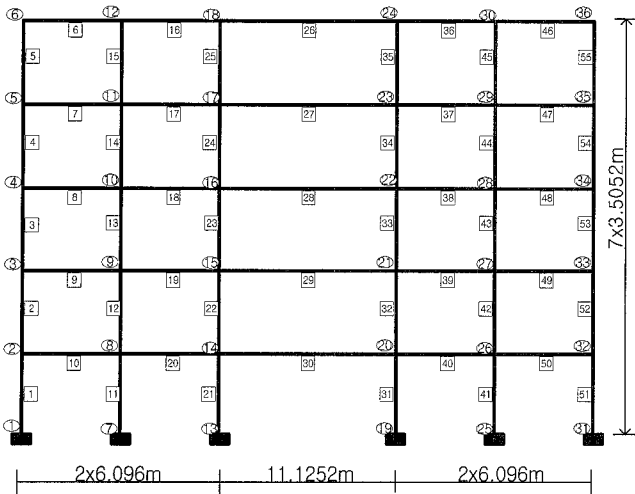


그림 4. 5층 5경간 강뼈대 구조물

또한 건설환경의 급격한 변화에 따른 본 연구 결과의 반응을 살펴보기 위하여 재료비 단가와 보-기둥간 강결의 단가 비율을 변화시키면서 본 설계 알고리즘을 수행하였다.

4.1 1 단계 최소 중량설계

본 연구의 대상 구조물인 그림 4와 같은 강 뼈대 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 2와 같이 고려하였다. 각 하중형태에 재하위치 및 크기는 표 3과 같다. 또한 사용되는 강 제품으로는 중량에 비해 큰 단면2차 모멘트를 가지며 실무에서 주로 사용되는 제품으로서 보와 기둥에 따라 표 4 및 그림 5와 같은 제품을 고려한다. 그 결과 표 5와 같은 최소 중량 설계값을 구하였다.

표 2. 하중 조건

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

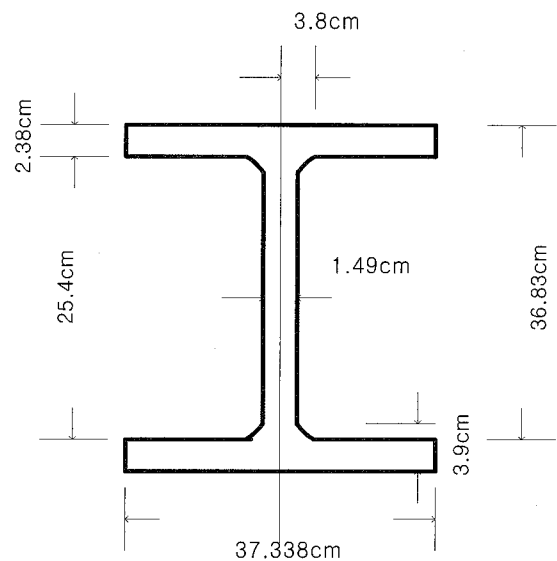


그림 5. W 형강 규격(예: W14x120)

표 3. 하중종류별 재하위치 및 하중크기

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

표 4. 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

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

4.2 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(7)과 같은 경비함수를 이용하며 이때 제작비와 관련한 항목은 Jarmai 등 (1999)의 결과를 토대로 총 제작비의 많은 부분을 차지하는 순으로 식(8) ~ (11)과 같은 용접, 절단, 도장, 강재의 준비의 항목들을 채택하여 본 연구의 총 경비함수의 제작비 부분을 산정하였다. 또한 사용되는 강 재료비 단가와 보-기둥간 부재 강결에 소요되는 경비 단가는 실무 기술자들의 자문을 통해 선정하였으며 강 재료비 단가로부터 강 제품 제작에 소요되는 시간별 제작 단가는 표 1을 참조하여 미국, 일본과 동일한 비율을 적용하여 산정하였다. 이상의 각 경비함수의 단가 및 유전알고리즘의 연산

과정 중 매개변수와 수렴조건은 표 6의 설계조건과 같다.

표 6. 설계조건

강 제품의 단위 무게(kg) 당 단가:	c_m (원/kg)	600
한 개소의 모멘트 연결 시 소요경비:	c_c (천원/개소)	400
제품 제작에 소요되는 시간별 제작 단가:	c_f (원/min)	1,200
개체 수	500	
교배 확률	0.75	
돌연변이 확률	0.001	
재생산 확률	0.75	
수렴기준	해의 변화가 없는 연속된 세대 수 : 5회	

표 7. 목적함수 값과 그 변화율

경비항목 (천원)	1단계 최소중량설계	2단계 최적 부재강결수 ($N_{opt}=32$)를 갖는 최적설계	경비 변화율(%)
강재료비	13,318.65	13,373.40	0.4%증가
제작비	42,974.56	43108.11	0.3%증가
부재강결비	20,000.00	12,800.00	36.0%감소
총 경비	76,293.21	69281.51	9.2%감소

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 본 연구의 주 내용인 선정된 모멘트 연결의 수의 변화에 따라 매번 본 설계 알고리즘을 수행하여 총 경비를 계산함으로써 강 뼈대 구조물의 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상관관계를 그림 6과 같이 나타내었다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 최소 총 경비를 갖는 최적의 모멘트 연결의 수($N_{opt} = 32$)를 결정할 수가 있다. 이때 목적함수인 총 경비함수의 변화율과 최적해는 표 7, 8과 같으며 보-기둥 간 부재 강결(모멘트 연결)의 배치는 그림 7과 같다.

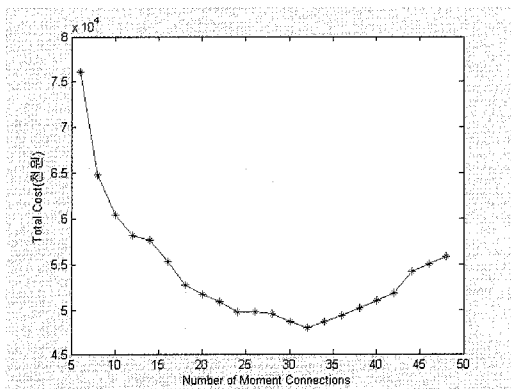


그림 6. 보-기둥간 모멘트 연결의 수의 변화에 따른 총 경비함수 변화

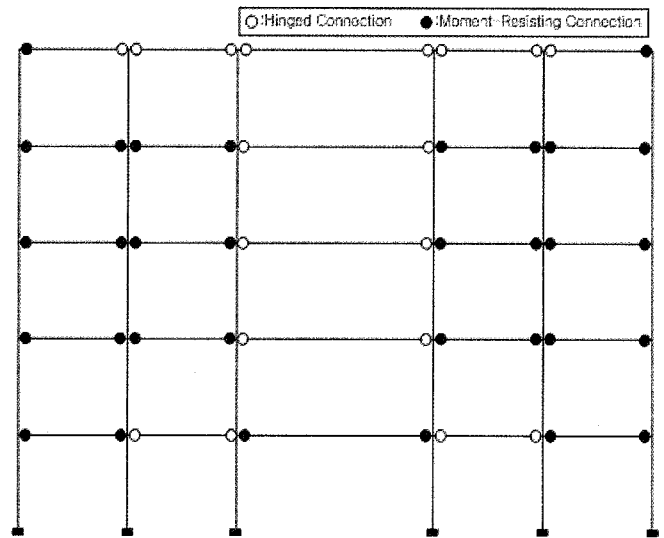


그림 7. 최적 모멘트 연결의 수($N_{opt}=32$)와 그 배치도

표 8. $N_{opt}=32$ 를 갖는 강 뼈대 구조물의 부재의 최적 설계값

구분	강제품	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
	W16x31	27
	W14x22	7,17,26,37,47
	W12x14	6,16,36,46

4.3 건설환경의 변화에 대한 본 설계시스템의 응답

서론에서 기술한 바대로 최근 건설 환경의 변화에서 노무비의 증가율은 재료비의 증가율보다 매우 빠르게 높아지고 있으며 특히 이러한 노무비의 증가량 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 현장에서 부재 연결과 관련된 것이다. 이러한 건설 환경의 변화에 대한 본 연구 알고리즘의 응답을 살펴보기 위하여 강재료비 단가에 대한 보-기둥간 부재 강결에 소요되는 단가와와의 비율(c_c/c_m)을 변화시키면서 본 연구 결과를 살펴 보았다. 그 결과 비율에 따라 표 9와 같이 최적의 모멘트 연결의 수(N_{opt})와 1단계 최소 중량설계에 의한 총경비와 2단계 최적설계에 의한 총경비 사이의 경비 감소율을 나타냈다. 또한 각 비율별 모멘트 연결의 수의 변화에 따른 총 경비함수의 변화를 그림 8에 나타내었다.

표 9. c_c/c_m 의 변화에 따른 총 경비합수 값과 그 변화율

구분	Case1	Case2	Case3	Case4
c_c/c_m	1.0	1.33	1.66	2.0
c_m (원/kg)	600	600	600	600
c_f (원/min)	1,200	1,200	1,200	1,200
c_c (천원/개소)	600.000	800.000	1,000.000	1,200.000
최소 중량 설계 시 총 경비(천원)	86,293.217	96,293.217	106,293.217	116,293.217
N_{opt} (개소)	32	32	32	26
N_{opt} 를 갖는 최적설계시 총경비	75,962.160	82,173.860	88,573.860	94,097.900
총 경비 감소율(%)	11.9	14.6	16.6	19.08

4.4 강뼈대 구조물의 최적설계 결과 비교 분석

앞 절에서 이루어진 5층 5경간 강뼈대 구조물의 최적설계 결과를 다음과 같이 비교 분석하였다.

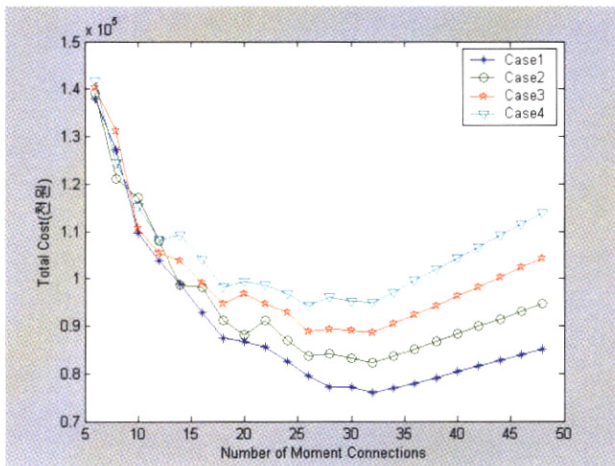


그림 8. c_c/c_m 비율 별 부재 간 모멘트 연결의 수의 변화에 따른 총 경비합수 변화

- ① 본 알고리즘의 주 연구대상인 모멘트 연결의 수 및 그 배치를 고려한 최적설계에 유용한 초기 설계해를 제공하는 단계인 1단계 최소 중량설계의 경우 모든 기둥과 보의 연결이 강결된 것으로 간주하고 실시된 것으로서 그 결과는 표 5와 같으며 이를 재해석 해본 결과 여기에서 얻어진 각 부재의 해는 강도제약조건의 한계치에 대해 70~45%, 변위제약조건의 한계치에 대해 98~72%의 값을 나타냄으로써 이는 변위제약조건에 의해 지배적으로 조절되었음을 알 수 있다.
- ② 본 연구의 모멘트 연결의 수를 고려한 2단계 최적설계를 통해 표 7과 같이 최소중량설계에 의한 결과보다 9.2%

더 총 경비를 줄일 수 있었다.

- ③ 사용되는 강 제품을 나타내는 설계변수와 보-기둥 간 모멘트 연결의 유무를 나타내는 이진수 설계변수와 같이 두 가지 타입의 설계변수를 사용함으로써, 표 8과 그림 7과 같은 모든 부재의 최적의 강제품의 결정뿐만 아니라 모든 보-기둥의 모멘트 연결의 유무에 따른 배치도 확인할 수 있었다.
- ④ 2단계 유전알고리즘에 의한 최적설계 수행 시 선정된 모멘트 연결의 수의 위배를 방지하기 위해 식(25)(26)과 같은 초기 해의 선정방법과 유전알고리즘의 연산과정 중 발생할 수 있는 위배에 대하여 모멘트 연결 수에 대한 제약조건을 고려함으로써 초기 선정된 모멘트 연결의 수를 최종 설계 해를 얻을 때까지 유지 할 수 있었다.
- ⑤ 선정된 모멘트 연결의 수를 달리하며 본 연구의 최적설계 알고리즘을 반복해서 수행함으로써, 그림 6과 같이 모멘트 연결의 수와 총 경비와의 상반관계를 나타낼 수 있었으며 이를 통해 최적의 모멘트 연결의 수를 결정할 수가 있었다.
- ⑥ 모든 보-기둥 간 연결 부위에 모멘트 연결의 유무를 나타내는 이진수 설계변수의 경우 넓은 탐색 공간으로 인해 유전알고리즘의 사용에 많은 개체수가 필요하게 되고 이로 인해 연산과정에 많은 시간이 소요하게 되었다.
- ⑦ 모멘트 연결의 수와 총경비와의 상반관계를 나타내는 그림 6을 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.
- ⑧ 실무에서 발생될 수 있는 기둥 간 연결의 문제점을 해결하기 위한 제약조건의 사용으로 말미암아 표 8에서 확인할 수 있듯이 아래층의 기둥의 단면적이 위층의 기둥 단면적보다 크거나 같도록 함으로써 현장에서 층별 기둥의 연결에 용이하도록 설계를 유도하였다.
- ⑨ 나날이 변화하는 건설 환경에 따라 재료비에 대한 노무비의 증가 비율을 고려한 연구 결과인 표 9에 따르면 c_c/c_m 의 비율이 커질수록 본 연구에 의한 총 경비의 감소율은 더욱 커지게 되며, 그림 8에서 볼 수 있듯이 모멘트 연결의 수가 최적의 모멘트 연결의 수(N_{opt}) 이상으로 변화 시 가파른 상승곡선을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 강 뼈대구조물의 최소 경비 설계를 위하여, 실제로 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 재료비 외에 제작비와 보-기둥 간 모멘트 연결 비를 포함한 총 경비함수를 가지고, 유전알고리즘에 기초한 최적화 기법을 사용하였다. 이를 위해 설계변수로 사용되는 강제품 외에 각 보와 기둥의 연결 부위의 모멘트 연결방법의 유무를 나타내는 이진 설계변수를 고려하였다. 또한 선정된 모멘트 연결의 수를 변화시키면서 본 알고리즘을 반복 수행하여, 총경비와 모멘트 연결의 수 사이의 상반관계를 나타내고자 하였다. 이러한 상반관계를 통해 최근의 건설 환경에서 재료비와 노무비의 증가율에 대한 문제점을 직접 다룸으로써 현실적인 강 뼈대구조물의 최적설계 해를 제시하고자 하였다.

본 연구의 설계시스템을 실제하중을 고려한 다층 다 경간 강 뼈대 구조물을 대상으로 수행한 결과와 그 결과 값의 비교 분석을 통하여 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 실제 강구조물의 설계법에서 제시하는 하중 조합의 사용과, 강재료비 외에 제작시간에 기초한 제작비 및 보-기둥 간 부재 연결비를 고려한 실 경비함수의 사용과 더불어 강뼈대 구조물 설계시 일반적인 설계여유의 중요 요소인 보-기둥 간 강결의 수와 그 배치까지 고려하였다. 또한 기존의 연구에서 많이 다루어진 강도 및 사용성 제약조건 외에 층별 기둥 간 연결 시 요구되어지는 실무적인 문제점까지 제약조건으로 다룸으로써 본 연구의 설계 결과는 실질적인 강 뼈대구조물의 최적설계를 다루었다고 사료된다.
- (2) 부재별 사용되는 강제품을 나타내는 설계변수 외에 모든 보-기둥 간 연결 부위에 모멘트 연결의 유무를 나타내는 이진수 설계변수의 사용하였으며, 초기 해 집단의 선정 시 모멘트 연결의 수에 대한 위배를 갖는 해 집단을 최소화할 수 있는 초기 해집단 선정방법을 사용하고 유전 알고리즘의 연산과정 중 발생될 수 있는 위배에 대하여 모멘트 연결 수에 대한 제약조건을 고려하여 초기 선정된 모멘트연결의 수를 최종 설계 해를 얻을 때까지 유지할 수 있도록 함으로써 선정된 모멘트 연결의 수와 최적설계 결과인총 경비함수 값과의 상반관계를 나타낼 수 있었다.
- (3) 본 연구는 강구조물의 최소중량설계에 그치지 않고 제작비와 부재 연결비를 고려함으로써 실 소요 경비에 근접한 경비함수를 사용하였으며, 더 나아가 재료비와 노무비 증가율에 따른 건설환경의 변화에 인식하여, 강구조

물의 시공시 노무비의 가장 많은 부분을 차지하는 현장에서의 가설 시 용접과 같은 부재 강결에 소요되는 비용을 줄이고자, 부재간 강결의 수와 총경비와의 상반관계를 명확히 나타냄으로써 급변하는 건설환경에 실질적인 최적설계값을 제시하였다고 판단된다.

- (4) 건설환경의 변화에 대한 본 설계시스템의 응답을 통해 살펴본 결과 장차 노무비의 증가율이 재료비의 증가율을 더욱 크게 앞서간다면 본 연구와 같은 결과가 절실히 요구됨을 예상할 수 있다.
- (5) 추후 연구과제로는 좀 더 세밀한 경비함수의 설정과 더불어 3차원 구조물에 대한 설계가 요구되며 이를 위해 보다 빠른 연산을 수행할 수 있는 최적화 기법도 요구된다.

참고 문헌

- 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. 4, 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, 한국강구조학회논문집, Vol.15, No.6, pp. 661-672
- 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
- Farkas J. and Jarmai K.(1997) Analysis and Optimum Design of Metal Structures, Rotterdam. Brookfield. Balkema Publishers.
- Fern D.T. and Yeo RBG(1990) Designing Cost Effective Weldments. *Welded Structures'90. Int. Confer.*

- London, pp.149-158
- 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
- Jarmai K. and Farkas J.(1999) Cost Calculation and Optimisation of Welded Steel Structures. *J. Construction Steel Research*, Vol.50, pp.115-135
- 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
- Nucor(1999) Nucor Steel Price List. Nucor Steel, Nucor Coporation. Jewel, Tex.
- 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.
- Saka M.P. and Kameshki E.S.(1998) Optimum Design of Unbraced Rigid Frames. *Comput. Struct*, Vol.69(4), pp. 433-442
- Simoës 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. 4. 14 / 심사일 2006. 5. 2 /
심사완료일 2007. 1. 10)