

재료 및 기하학적 비선형을 고려한 브레이싱된 강뼈대구조물의 최적설계

The Discrete Optimum Design of Steel Frame Considering Material and Geometrical Nonlinearities

장 준 호¹⁾ · 박 문 호²⁾ · 이 해 경³⁾ · 박 순 응⁴⁾
Chang, Chun Ho Park, Moon Ho Lee, Hae Kyoung Park, Soon Eung

요 약 : 본 연구의 목적은 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 고등해석을 이용한 브레이싱된 강뼈대구조물의 최적설계 알고리즘을 개발하는데 있다. 구조물의 해석과정에서 비선형효과를 모두 고려함으로써 기둥의 유효길이 연산이 필요없는 최적설계 알고리즘을 제시하였으며, 전체 구조시스템 및 개별부재의 정보를 이용하여 최적화 하는 2 파라미터형 다단계 최적화 기법을 개발하였다. 해석기법은 단면소성힌지(zero-length plastic hinge) 개념을 이용한 개선된 소성힌지해석법을 수행하였으며, AISC-LRFD '94 기준을 이용하여 최적화 문제를 형성하였다. 본 알고리즘을 브레이싱된 강뼈대구조물에 적용하여 본 연구의 타당성, 효율성, 경제성을 비교검토 하였다.

ABSTRACT : The objective of the research is to develop an algorithm for the optimum design of two-dimensional braced steel frames using an advanced analysis, which considers both material and geometric nonlinearities. Since both nonlinearities are considered in analysis process, Optimum design algorithm which does not require to calculate K-factor is presented. A multi-level discrete optimization technique with two parameters that uses the information of structural system and separate member has been developed. The structural analysis is performed by the refined plastic-hinge method which is based on zero-length plastic hinge theory. Optimization problem are formulated by AISC-LRFD code. The feasibility, validity and efficiency of the developed algorithm is demonstrated by the results of the braced steel frame.

핵심용어 : 강뼈대구조물, 2파라미터형 다단계 최적화기법, 최적설계, 탄소성힌지해석
KEYWORDS : braced steel frame, multi-level optimization technique with two parameters, optimum design, advanced analysis, refined plastic-hinge method

-
- 1) 정회원, Researcher, EERC, University of California at Berkeley
 - 2) 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수
 - 3) 주식회사 다산건설탄트 대표이사
 - 4) 경북대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최적설계는 하드웨어 및 소프트웨어의 발전에 힘입어 많은 구조설계 프로그램이 개발되어 왔다. 하지만 이들 설계프로그램들은 기둥부재의 설계 시 유효길이계수 연산을 자동적으로 하지 못하고, 설계자가 매번 그림 1의 Alignment chart method를 이용하여 개별부재마다 기둥의 유효길 이 계수를 계산하여 입력하거나, 1로 가정하여 설계를 하게 된다. 하지만 두 방법마다 많은 문제 점을 갖고 있다. Alignment chart method은 모든 기둥이 동시에 좌굴을 일으켜야 한다는등의 불합리한 가정조건을 갖고 있고, 일일이 설계자가 그림을 통해 구하여야만 한다. 또한 유효길이계수 를 1로 가정하여 브레이싱된 뼈대구조물을 설계 할 경우 기둥의 강성을 실제보다 과소평가되어 안정적 인 설계는 되겠지만 그만큼의 여유가 불가 피하게 고려되어 기둥부재가 과다설계가 되는 결 과가 된다. 근본적으로 기둥의 유효길이계수를 이 용한 설계는 탄성해석을 근간으로 한 구조시스템 부재와 비탄성 해석을 근간으로 한 개별부재 사 이에 적합조건이 성립하지 않는다는 문제점을 내 포하고 있다.⁽¹⁾ 그래서 이런 문제점을 해결하기

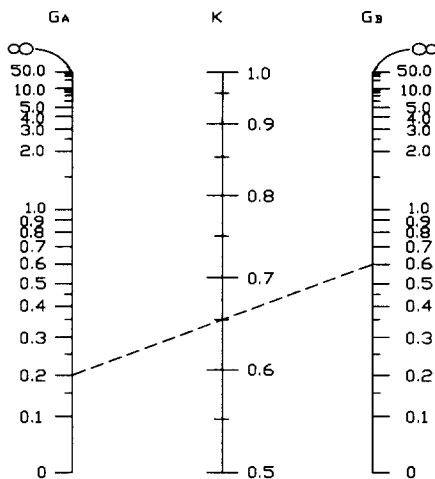


그림 1. 브레이싱된 뼈대구조의 Alignment Chart

위하여 해석과정에서 재료 및 기하학적 비선형효 과를 모두 고려함으로써 기둥의 유효길이계수의 연산없이 설계가 가능한 방법이 필요하다. 따라서 이러한 비선형을 고려함과 동시에 비선형해석을 탄성해석과 같이 용이하게 할 수 있게한 해석이 고등해석이다.⁽²⁻⁴⁾ 지금까지 비선형효과 및 국부 좌굴등을 고려한 해석에 주로 연구가 진행되고 있으나, 이를 이용한 경제성과 안정성을 겸비한 해석과 설계를 동시에 수행할 수 있는 최적설계 에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 고등해석기법중 하중 증분기법을 이용한 개선된 소성힌지해석법을 적 용하여 개별부재 및 전체 구조시스템의 정보를 이용 최적화를 수행할 수 있는 이산화 최적화기 법을 개발하였다. 개발된 최적화 기법을 이용하여 개별부재와 구조시스템의 제약조건식을 유도하여 기존의 강도위주의 제약조건식뿐만 아니라 사용 성 제약조건식도 고려하여 실무에서도 유용하게 이용할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

최적화문제형성시 목적함수는 강재의 중량을 택하였고, 제약조건은 American Institute of Steel Construction(AISC)-LRFD 94⁽⁵⁾ 규준 에 의해 조건식을 정식화 하였다. 부재의 단면은 AISC- LRFD의 Wide Flange 단면을 이용하였 으며, 이산화 최적설계를 수행하였다. 본 연구의 브레이싱된 강뼈대구조물의 결과는 유한요소해석 법을 이용한 범용프로그램인 SAP2000⁽⁶⁾의 설계 와 비교하였다.

2. 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 해석

본 연구에서 이용한 2차 비탄성 비선형 해석, 즉 고등해석(advanced analysis)은 개별 부재 는 물론 전체 구조시스템의 극한 상태의 강도와 안전성을 충분히 예측할 수 있는 방법이다. 고등 해석은 소성영역법, 탄소성힌지법, 그리고 개선된 소성힌지해석법으로 구분할수 있는데 본 연구에 서는 개선된 소성힌지해석법을 이용하였다. 이 방

법은 하중이 증분됨에 따라 소성힌지의 강성이 점차적으로 감소한다는 가정하에 단면의 소성화의 효과를 나타내었고, 부재의 비탄성거동을 각단계의 응력과 변위의 함수가 아닌 부재력으로 나타내었다. 이 해석법의 장점은 기존의 탄소성힌지 해석법의 용이성과 모멘트와 회전각의 관계로부터 유도된 식을 이용한 효율적인 해석법이고 구조시스템 뿐만 아니라 개별부재의 강도와 안정성을 정확히 파악할 수 있다는 것이다. 해석법에서 고려한 비선형 효과를 기술하면 다음과 같다.⁽⁷⁾

2.1 기하학적 비선형

기하학적 비선형효과는 두 가지로 분류할 수 있는데 첫 번째는 P- Δ 및 P- δ 효과를 지칭하는 2차효과(Second-order effect)이다. 2차효과를 고려하기 위하여 안정함수(stability function)를 이용하였다. 안정함수를 이용하면 보-기둥부재를 하나의 요소만 이용하여도 충분히 2차효과를 고려할 수 있는 장점이 있다. 이 안정함수를 증분힘-변위관계로 나타내면 식(1)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{pmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, \dot{M}_A , \dot{M}_B , $\dot{\theta}_A$, $\dot{\theta}_B$ 는 각각 요소의 A, B점에서의 증분된 단부 모멘트와 절점회전을 나타내고 \dot{p} 와 \dot{e} 는 요소의 길이방향의 증분된 축력과 변위를 나타낸다. S_1 과 S_2 는 부재의 휨 강성도에 축력의 효과를 설명하는 안정함수이다. 두 번째는 기하학적 부정(Geometrical imperfection)이다. 기하학적 부정은 제작 또는 구조물의 시공 과정에서 필연적으로 발생하는 것으로서 이 부정으로 말미암아 기둥에 추가적인 모멘트가 발생하여 부재의 휨강성이 감소하게 된다. 이를 고려하

는 방법은 명시부정모델링방법, 가상하중을 이용하는 방법과 감소접선탄성계수법이 연구되어 있으나, 본 연구는 간편성과 효율성이 좋은 감소접선탄성계수법⁽⁴⁾을 이용하였다. 감소접선탄성계수법은 기둥의 접선탄성계수를 15%감소시켜 기하학적 부정효과를 고려하도록 되어있다. 이를 식 (2a,b)으로 나타낼 수 있다.

$P > 0.5P_y$ 인 경우

$$E'_i = 4 \frac{P}{P_y} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) E \zeta_i \quad (2a)$$

$P \leq 0.5P_y$ 인 경우

$$E'_i = E \zeta_i \quad (2b)$$

여기서 E'_i = 감소된 E_i , ζ_i = 기하학적 부정을 고려하기 위한 감소계수이다.

2.2 재료학적 비탄성

재료의 비탄성은 강재의 제작과정에서 발생되는 잔류응력에 의한 강성감소와 휨모멘트의 증가에 따른 휨강성감소를 지칭한다. 잔류응력으로 인한 점진적 소성효과를 나타내기 위하여 CRC (Column Research Council) 접선탄성계수를 포물선함수로 감소하도록 하여 소성효과를 고려하였다. 이를 수식화하면 식 (3a,b)로 나타낼 수 있다.

$P \leq 0.5P_y$ 인 경우

$$E_i = 1.0E \quad (3a)$$

$P > 0.5P_y$ 인 경우

$$\frac{E_i}{E} = \frac{4P}{P_y} \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad (3b)$$

휨에 의한 점진적 항복효과는 두 개의 항복표면을 이용한 강성도를 감소시키는 모델을 이용하

여 고려하였다. 그래서, 개선된 소성힌지해석법에서는 부재의 강성도는 부재의 단부력이 초기 항복합수를 초과한 후에 포물선으로 감소하는 것으로 가정되었다. 부재의 강성도 감소를 나타내는 η 의 표현은 식(4a,b)와 같은 함수로 표시했다.

$$\alpha \leq 0.5 : \eta = 1 \quad (4a)$$

$$\alpha > 0.5 : \eta = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (4b)$$

여기서, α 는 그림 3과 같이 단면력의 소성정도를 나타내는 매개변수로서 부재끝단의 축력과 휨모멘트의 크기를 나타내는 변수이다.

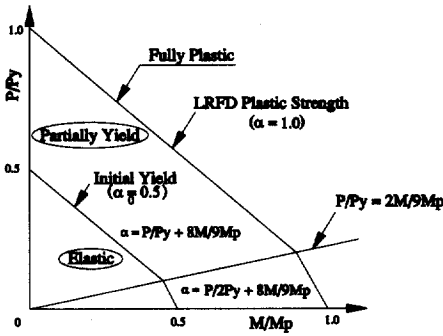


그림 3. 항복면의 강성감소 모델

3. 최적화 기법

3.1 보와 기둥의 단면선택 기준

WF 부재선택에 있어서 어떤 선택기준을 적용하는가에 따라 전혀 다른 결과를 가져올 수 있다. 기존의 WF의 데이터를 이용한 이산화 최적화에서는 제약조건식을 만족하는 단면중에서 가장 작은 단면적의 부재를 선택하였다. 그러나, 현재 생산되는 강재들은 같은 단면적을 가진 부재들이 여러개 존재하며, 그 중에서 역학적으로 제일 유리한 단면을 선택할 기준이 필요하다. 예를 들어, 보부재인 경우 단면적이 동일한 부재에서 소성단

면계수가 큰 단면을 선택해야 가장 경제적이면서 역학적으로 안정된 단면선택이 되는 것이다. WF 형강중에 단면적이 같은 부재들 중에서 단면계수의 차가 5~25% 정도가 되어 이를 분류, 선별하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 다음 그림 4는 WF단면의 단면2차모멘트와 소성단면계수와의 관계를 점으로 나타내었다. 이 단면들 중 그림 4와 같이 전체 강재들 중에서 같은 단면적 중 큰 소성단면계수를 가지는 그룹들을 선정하여, 이 그룹 중에서 보부재를 선택케 하였다. 판별식은 3개의 매개변수를 이용한 회귀분석을 수행하여 구하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$F(X) \geq -14.2116 + 14.56X^{0.13} \quad (5)$$

여기서 X는 단면 2차모멘트, F(X)는 소성단면계수이다.

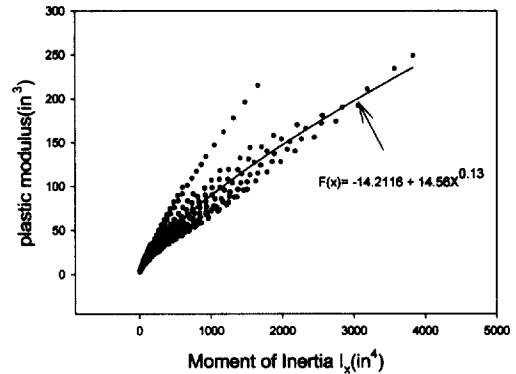


그림 4. WF 단면의 단면2차 모멘트와 소성단면계수의 관계

기둥부재인 경우, 필요한 단면적을 만족시키면서 좌굴과 밀접한 단면특성인 회전반경이 큰 단면들로 그룹을 형성하였다. 3개의 매개변수를 이용한 회귀분석을 수행하여 구한 식은 다음과 같다.

$$F(X) \geq 1.26 + 0.5812X^{0.73} \quad (6)$$

여기서, X는 단면2차모멘트, F(X)는 회전반경이다.

3.2 2파라미터형 다단계 최적화기법

개선된 소성힌지해석결과로부터 얻은 구조시스템의 강도에 대한 정보와 개별부재의 항복을 및 처짐등에 관한 정보를 유기적으로 연결 할 수 있는 최적화기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 2 파라미터형 다단계 최적 설계기법⁽⁸⁾에서는 제약조건을 구조시스템의 제약조건과 개별부재의 제약조건으로 나누어 형성하였다. 그리고 구조시스템의 보유내하력 및 횡방향처짐과 개별부재의 항복률등의 정보를 사용하여 개별부재가 임계화가 되도록 2가지의 파라미터를 이용하여 제약조건식들로 형성된 설계영역에서 목적함수를 최소화하는 기법을 개발하였다. 본 연구에서는 개발한 다단계 최적화기법의 알고리즘은 그림 5과 같다.

- (1) 초기 단면을 가정하여 입력을 한다.
- (2) 가정한 단면으로 개선된 소성힌지해석을 수행한다.

- (3) 해석결과에서 결과분석과정을 수행한다. 개별부재의 항복율, 부재의 변형, 하중증분에 따른 소성힌지 생성위치, 구조시스템의 횡방향 변위등의 정보를 연산 또는 기록한다.
- (4) 결과분석에서 나온 정보를 이용하여 그림 6과 같이 제약조건식을 형성한다. 이 제약조건들을 검토하여 만족하면 목적함수의 수렴 여부를 검토하고, 그렇지 않으면 방향탐사과정을 수행하여 바뀐 단면부재로 새로운 구조시스템을 형성하게 된다.
- (5) 방향탐사과정은 가정한 단면의 탄성해석 결과(Fe)와 구조해석에 쓰인 축척치(S.F.), 목적 임계하중계수(Desired Limit Load Factor: D.L.L. F), 목적횡방향변위계수(Desired Frame Drift: D.F.D)의 식으로 조정된 단면력(Fm)를 연산한다.

$$F_m = F_e \times S.F \times D.L.L.F \times D.F.D \quad (7)$$

이 조정된 단면력이 첫 번째 방향을 제시하는 기

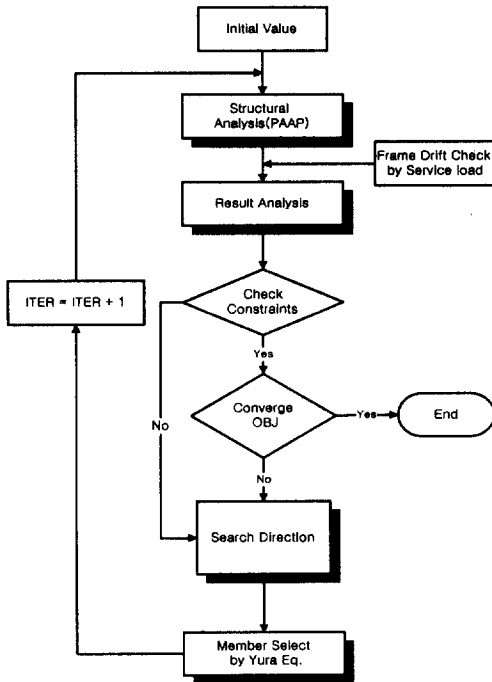


그림 5. 최적화 알고리즘의 순서도

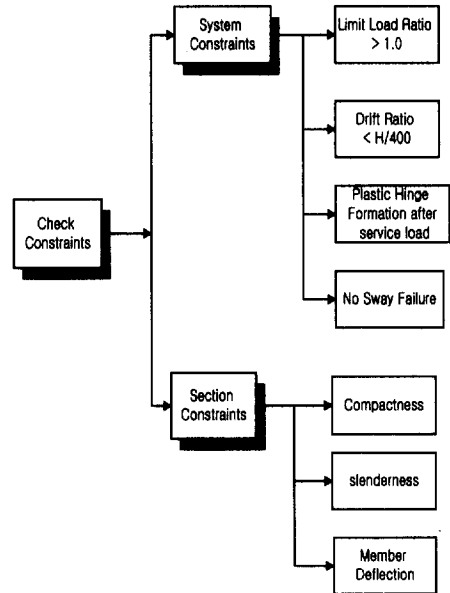


그림 6. 제약조건식의 분류

점이 되는 것이다.

(6) 5단계를 통하여 조절된 단면력을 이용하여 부재를 선택한다. 부재의 단면선택식은 Yura⁽⁹⁾가 제시한 보-기둥의 단면가정식을 이용하였다. 연직하중조합하에서는 식 (8)과 같이 축력과 모멘트를 하나의 축력으로 환산하는 등가축력식이다.

$$P_{u,eq} = P_u + \frac{2M_{ux}}{d} + \frac{7.5M_{uy}}{b} \quad (8)$$

여기서, $P_{u,eq}$ 는 등가 축력, M_{ux} 는 강축에 대한 계수휨모멘트, M_{uy} 는 약축에 대한 계수휨모멘트, P_u 는 축력, d 는 보의 깊이, b 는 보의 폭이다. 두 번째, 수평하중이 있는 하중조합하에서는 식 (9)와 같이 축력과 모멘트를 하나의 모멘트로 환산하는 등가 모멘트식을 추천하고 있다.

$$M_{u,eq} = M_{ux} + \frac{P_{ud}}{2} \quad (9)$$

본 연구에서는 개별 부재마다 등가축력식과 등가모멘트식을 각각 계산하여 등가축력식에서 필요한 단면적과 등가모멘트식에서 필요한 소성단면계수를 구하여, 두 단면특성을 모두 만족하면서 최소 중량인 단면을 선택하도록 하였다.

(7) 목적함수가 수립할 때까지 2단계에서 6단계를 반복한다.

4. 강뼈대구조물의 최적화 문제 형성

AISC 규격의 WF형강(W4×13~W40×328)을 이용하여 브레이싱된 강뼈대구조물의 이산화 최적설계를 수행하였다. 이용한 WF형강의 항복응력은 $F_y = 36 \text{ ksi}$, 탄성계수는 $E = 29000 \text{ ksi}$, 단위중량은 $\rho = 0.284 \text{ lb/in}^3$ 이다.

본 연구의 강뼈대 구조물의 목적함수는 식(10)과 같다.

$$OBJ(x) = \rho \left[\sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NB} (V_b)_{ij} + \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NC} (V_c)_{ij} + \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NBR} (V_{br})_{ij} \right] \quad (10)$$

여기서, $(V_b)_{ij}$ 는 i 번째 층의 j 번째 보의 체적, $(V_c)_{ij}$ 는 i 번째 층의 j 번째 기둥의 체적, $(V_{br})_{ij}$ 는 i 번째 층의 j 번째 브레이싱의 체적, NS는 구조물층의 수, NC는 한층의 기둥의 수, NB는 구조물의 경간수, NBR은 한층의 브레이싱의 수이다. 본 4장에 언급된 수식의 아랫첨자 i 는 i 번째층을 지칭하며, j 는 j 번째부재를 지칭한다. 본 연구의 제약조건은 구조시스템에 대한 제약조건식과 개별부재에 대한 제약조건식으로 나누어 정식화 하였다.

4.1 구조시스템의 최적화 문제 형성

(1) 임계하중계수의 제약 조건식

임계하중계수란 구조물이 파괴기구를 형성했을 때의 임계하중과 설계하중의 비로써, 임계하중계수는 항상 1보다 큰 값, 즉 설계하중보다 큰 하중에서 파괴가 이루어져야 한다.

$$G(1) = \lambda - 1.0 \geq 0 \quad (11)$$

여기서, λ = 임계하중계수이다.

(2) 횡방향 변위에 대한 제약 조건식

수평하중에 의한 최상위층의 횡방향 변위에 대한 사용성조건은 Ad Hoc Committee⁽¹⁰⁾와 Ellingwood⁽¹¹⁾가 제안한 처짐제한을 이용하여 제약조건식화 하였다.

$$G(2) = \frac{H}{400} - (\Delta_H)_F \geq 0 \quad (12)$$

여기서, H = 구조물의 총높이, $(\Delta_H)_F$ = 최상위층의 수평변위이다.

(3) 소성힌지 형성에 대한 제약조건

구조해석 결과를 분석하여 첫 번째 소성힌지는 사용하중에 도달하기 전에 형성되어선 안된다는 사용성에 대한 조건의 만족여부를 검토한다.

$$G(3) = P_{Mpl} - P_{SL} \geq 0 \quad (13)$$

여기서, P_{Mpl} = 첫번째 소성힌지가 발생되었을 때의 하중, P_{SL} = 사용하중이다.

(4) 보 파괴 기구 유도에 대한 제약조건

구조해석 결과에서 소성힌지의 형성이 하나의 기둥에 2개의 소성힌지가 생성되는지를 분석한다. 만약 이 조건을 만족하면 개별부재의 제약조건을 검토하고 만족치 못하면 방향탐사과정을 거쳐 새로운 단면으로 조정하게 된다. 단면의 강성조절은 보의 강성보다 상대적으로 기둥의 강성을 크게 하여, 보에 의한 파괴기구가 되도록 조정한다.

$$G(4) = 2 - NCOL_{ph} > 0 \quad (14)$$

여기서, $NCOL_{ph}$ = 한기둥의 소성힌지갯수이다.

4.2 개별부재의 최적화 문제 형성

(1) 보-기둥의 최적화 문제 형성

하중저항계수법의 H1.1 시방규정에 따라 보-기둥의 상관관계식을 식(15a), 식(15b)로 정식화 하였다.

$$\left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) \geq 0.2 \text{ 인 경우,}$$

$$G_{ij}(3) = 1.0 - \left\{ \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_u}{\phi_b M_n} \right) \right\}_{ij} \geq 0 \quad (15a)$$

$$\left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) < 0.2 \text{ 인 경우,}$$

$$G_{ij}(3) = 1.0 - \left\{ \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_u}{\phi_b M_n} \right) \right\}_{ij} \geq 0 \quad (15b)$$

여기서, P_n = 공칭압축강도, P_u = 극한압축강도, M_n = 극한휨강도, M_u = 공칭휨강도, ϕ_c = 압축부재의 감소계수(0.85), ϕ_b = 휨부재의 감소계수(0.9)이다.

(2) 보의 최적화 문제 형성

1) 보 단면의 폭-두께비 제약조건식

보 단면 설계는 조밀 단면이 되도록 설계하여야 한다. 조밀 단면의 보가 되기 위해서는 폭-두께비에 관한 제약식인 LRFD TABLE B5.1 시방규정에 의하여 식 (16a)와 식 (16b)를 만족하여야만 한다.

$$G_{ij}(1) = \frac{65}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (16a)$$

$$G_{ij}(2) = \frac{640}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{d}{t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (16b)$$

2) 사용성 제약 조건식

개별부재별의 수직처짐의 제약조건은 식 (17)으로 정식화 하였다.

$$G(3) = \left(\frac{L_b}{360} \right)_{ij} - (\Delta_{bw})_{ij} \geq 0 \quad (17)$$

여기서, $(L_b)_{ij}$: 보의 길이, $(\Delta_{bw})_{ij}$: i 번째층

j번째 보의 수직처짐이다.

3) 보의 단면형상에 대한 제약조건식

단면의 시공성에 관한 제약조건식은 식 (18a)부터 식(18d)까지 정식화하였으며, 여기서 b_f, t_f, t_w , 및 d 의 단위는 inch, F_y 의 단위는 lb/in^2 이다.

$$G_{ij}(4) = (b_f)_{ij} - (b_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (18a)$$

$$G_{ij}(5) = (d)_{ij} - (d)_{i+1,j} \geq 0 \quad (18b)$$

$$G_{ij}(6) = (t_f)_{ij} - (t_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (18c)$$

$$G_{ij}(7) = (t_w)_{ij} - (t_w)_{i+1,j} \geq 0 \quad (18d)$$

(3) 기둥의 최적화 문제 형성

기둥의 제약조건식은 4가지를 고려하였는데 첫째 폭-두께비의 제약조건식으로써 LRFD TABLE B5.1의 규정을 근거로 정식화 하였으며, 둘째 전단강도에 관한 식을 LRFD F2-1~F2-3 규정을 이용하여 정식화 하였고 셋째 세장비에 대한 제약조건식은 LRFD E1 규정을 이용하였고, 넷째는 시공성을 고려하여 기둥단면의 치수에 관한 제약조건을 정식화 하였다.

(4) 브레이싱의 제약조건식

1) 브레이싱의 유연성 제약조건식

인장 및 압축을 받는 브레이싱의 설계도 조밀 단면이 되도록 설계 하였다. 즉, 국부좌굴이 발생하지 않도록 LRFD 9.2.d 시방규정에 따라 식 (19a)와 식 (19b)의 폭-두께비 제약조건식을 만족하여야 한다.

$$G_{ij}(1) = \frac{52}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{b_f}{2 t_f} \right)_{ij} \geq 0 \quad (19a)$$

$$G_{ij}(2) = \frac{253}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{d}{t_w} \right)_{ij} \geq 0 \quad (19b)$$

2) 브레이싱의 압축력에 대한 압축강도 제약조건식

브레이싱의 압축강도 제약조건식은 LRFD 9.2.b의 시방규정에 따라 식 (20)과 같이 정식화된다.

$$G_{ij}(3) = (0.8 \phi_c P_n)_{ij} - (P_u)_{ij} \geq 0 \quad (20)$$

여기서, ϕ_c 는 0.85이며, $(P_u)_{ij}$ 는 i번째층 j번째 브레이싱의 극한압축강도, $(\phi_c P_n)_{ij}$ 는 브레이싱의 설계압축강도이다.

3) 브레이싱의 인장력에 대한 인장강도 제약조건식

브레이싱이 인장을 받는 경우의 LRFD 9.3~9.4의 시방규정에 따라 강도제약조건식은 식 (21)과 같이 정식화 된다.

$$G_{ij}(4) = (\phi_t P_n)_{ij} - (P_u)_{ij} \geq 0 \quad (21)$$

4) 브레이싱 부재의 세장비 제약조건식

압축 및 인장을 받는 브레이싱 부재는 LRFD 9.2.a 시방규정에 따라 다음의 식 (22)의 세장비 제약조건식을 만족해야만 한다.

$$G_{ij}(5) = \frac{720}{\sqrt{F_y}} - \left(\frac{L}{r} \right)_{ij} = 102 - \left(\frac{L}{r} \right)_{ij} \geq 0 \quad (22)$$

5) 브레이싱의 단면형상의 제약조건식

브레이싱 부재 단면의 사용성 및 단면형상에 대한 제약조건식은 다음의 식 (23a)부터 식 (23d)와 같이 정식화 된다.

$$G_{ij}(6) = (b_f)_{ij} - (b_f)_{i+1,j} \geq 0 \quad (23a)$$

$$G_{ij}(7) = (d)_{ij} - (d)_{i+1, j} \geq 0 \quad (23b)$$

$$G_{ij}(8) = (t_f)_{ij} - (t_f)_{i+1, j} \geq 0 \quad (23c)$$

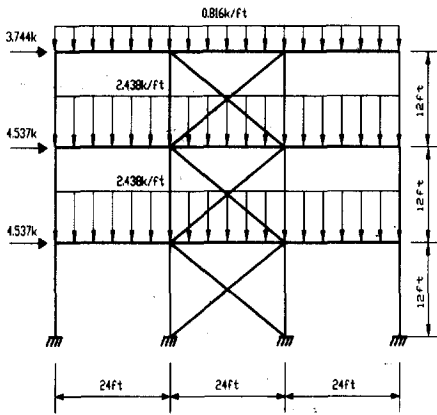
$$G_{ij}(9) = (t_w)_{ij} - (t_w)_{i+1, j} \geq 0 \quad (23d)$$

5. 수치예제 및 결과고찰

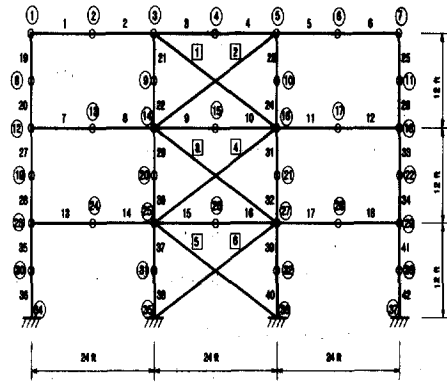
그림 7(a)와 같이 등분포 하중을 받는 3층 3경간 X-브레이싱 강뼈대구조물에 대하여 최적설계를 수행하였다. 뼈대구조를 구성하고 있는 보와 기둥은 강접 연결부를 갖고 있으며 X-브레이싱 부재들은 헌지 연결부를 갖고 있다. 7(b)와 같이

등분포하중을 집중하중으로 치환한 형상이고, 7(c)는 고등해석을 위한 부재와 절점을 모델링 하였다. 브레이싱된 구조일때는 기둥을 2개의 요소로 나누어 모델링을 수행하는 것이 더욱 정확한 해석을 수행할 수 있다. 7(d)는 최적설계를 위한 설계모델을 나타내었다.

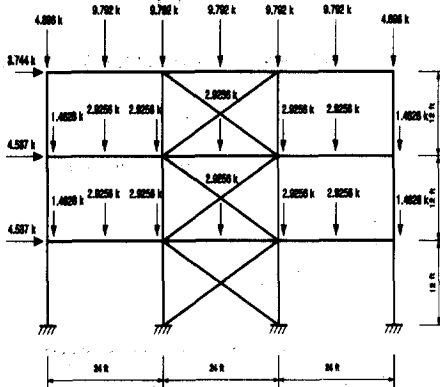
본 예제의 3층 3경간 X-브레이싱 목적함수의 수렴과정은 그림 8에 도시하였다. 수렴과정은 4~6회에 빠른 수렴을 보여 주었고, 큰 진동(oscillation) 없이 안정성있게 수렴하였다. SAP 2000 프로그램을 이용한 최적설계의 목적함수와 비교하였을 때, 본 논문이 주로 보단면의 경량화로 약 18%의 경비절감을 얻을 수 있었다. 임계



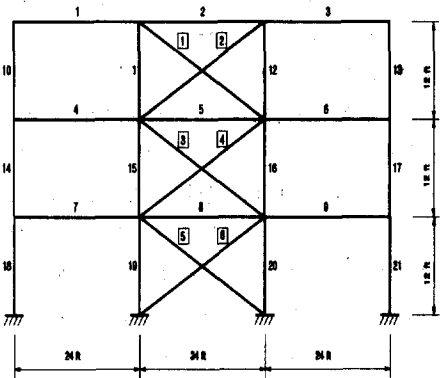
(a) 3층 3경간 형상



(c) 구조해석 모델



(b) 집중하중으로 치환한 형상



(d) 설계모델

그림 7. 3층 3경간 X-브레이스 뼈대 구조물

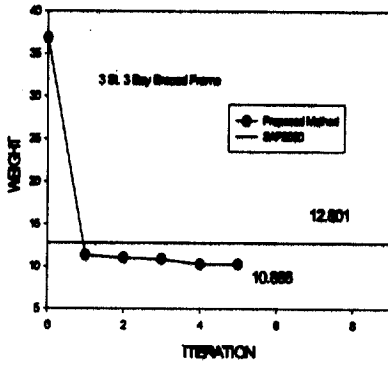


그림 8. 3층 3경간 X-브레이싱 뼈대구조의 최적합수 수렴과정

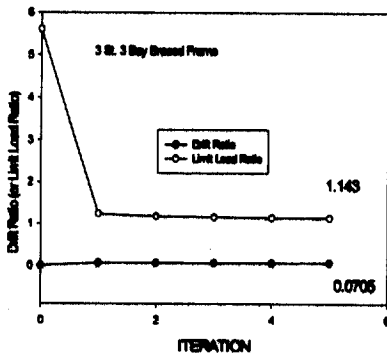
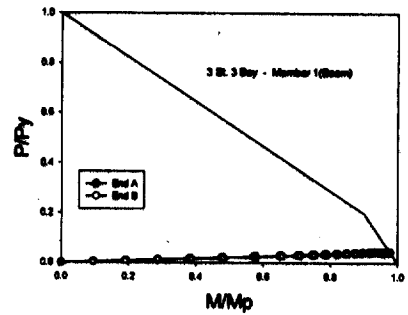
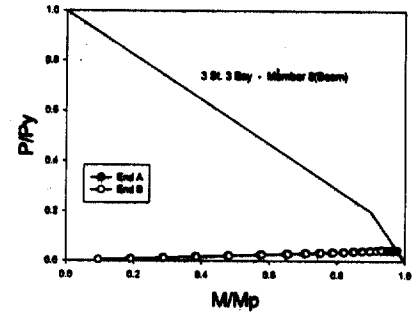


그림 9. 임계하중계수와 횡방향변위 계수의 수렴과정

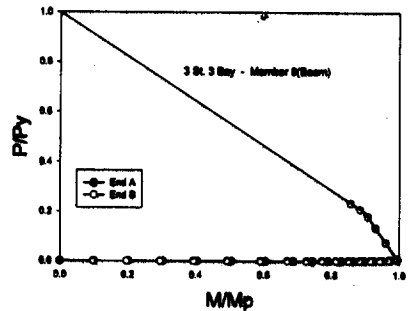
하중계수와 횡방향 변위계수의 수렴과정은 그림 9에 나타나 있다. 횡방향변위계수는 브레이스 구조로 인하여 매우 적은 값을 가지므로, 두 계수가 안정적인 수렴을 보여주고 있다. 이는 브레이싱된 뼈대구조물과 같이 횡변위가 구속된 구조물 일수록 횡방향 변위가 브레이싱이 없는 구조물에 비해 적은 값을 가지므로 임계하중계수가 용이하게 수렴하였는 것으로 여겨진다. 본 논문의 최적설계 결과는 표 1에 나타나 있다. SAP2000의 최적설계결과와 비교하면, 보의 경우 본 논문에서 선택된 부재가 중량이 이단계에서 세단계까지 경제적인 단면선택이 되었다. 이는 그림 10 (a)~(g)는 보부재의 항복정도를 보여주고 있는데, 대부분 임계하중을 받고 있음에 기인한 것으로 사료된다. 특히 그림 10(c)의 9번 보부재(2층 중간경간의 왼쪽보)의 단부 B는 모멘트 재분배 과정을 잘



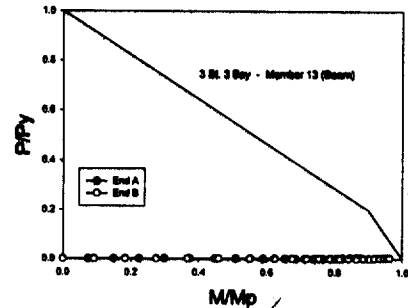
(a) 해석 모델 1번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



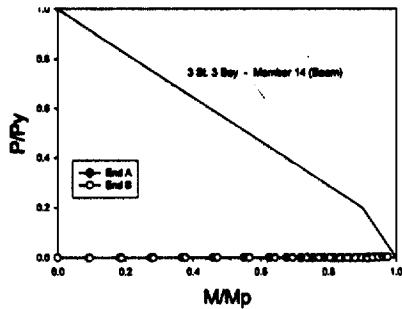
(b) 8번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



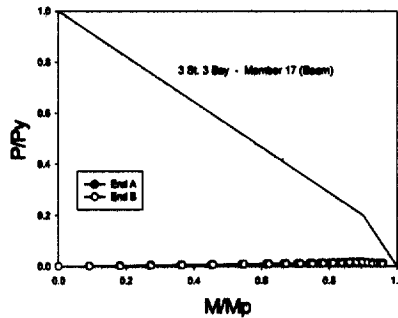
(c) 9번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



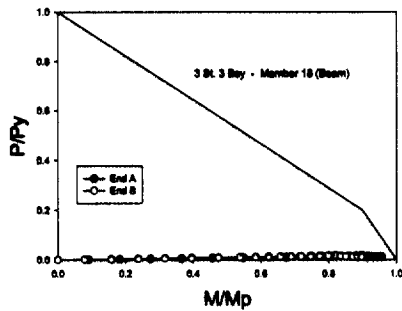
(d) 13번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



(e) 14번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



(f) 17번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도



(g) 18번 보부재의 축력-모멘트 상관관계도

그림 10. 3층 3경간 X-브레이싱 뱀대구조의 축력과 모멘트 상관관계도

보여 주고 있다. 단면력 중 모멘트에 의하여 임계선을 따라 분배되고 있음을 알 수 있다. 본 최적설계의 경제적인 결과는 주로 보부재의 경량화에서 기인되며, 기둥부재는 증량의 차가 3%으로써 매우 유사한 결과를 얻었다.

표 1. 3층 3경간 브레이싱된 뱀대구조의 최적설계 결과

member group	Member I.D	Proposed Method	SAP2000
Beam	1.3	W10×12	W12×26
	2	W10×12	W10×22
	4.6	W12×26	W16×45
	5	W14×22	W16×31
	7.9	W12×26	W16×31
	8	W14×22	W16×31
	Beam Total Weight	5.784 kips	7.812 kips
Column	10.13	W14×22	W8×21
	11.12	W6×15	W6×12
	14.17	W16×26	W12×26
	15.16	W12×26	W8×24
	18.21	W16×31	W12×30
	19.20	W12×30	W10×33
	Column Total Weight	3.612 kips	3.512 kips
Brace	22.23	W6×9	W6×9
	24.25	W6×9	W6×9
	26.27	W6×9	W6×9
		Brace Total Weight	1.470 kips
Total Weight		10.866 kips	12.794 kips

6. 결 론

본 연구에서는 개선된 소성현지해석을 수행하여 브레이싱된 구조물의 구조적 안정성과 경제성을 갖춘 최적설계 알고리즘을 개발하였으며, 강뱀대구조물의 해석과 설계문제를 체계적으로 종합화하였다. 개발된 최적설계이론을 강뱀대구조물에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재료 및 기하학적 비선형을 고려한 개선된 소성현지해석법과 이산화 최적설계 알고리즘을 이용하여 구조해석과 최적설계를 동시에 할 수 있는 자동화된 종합적인 강뱀대구조물의 최적설계 알고리즘을 개발하였다.
- 2) 이산화 최적화기법인 2 파라미터형 다단계 최적화 기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 최적화 기법을 설계예에 적용한 결과, 이산화 설계 단면들이 효율적이며 신뢰성 있게 최적설계 단면으로 수렴함을 알 수 있었다.

- 3) 본 연구의 최적설계 프로그램을 이용함으로써 기존 시방서에서 제시하는 개별부재의 강도검토 및 기둥의 유효계수의 계산이 필요치 않고, 용력제약조건과 사용성의 제약조건을 모두 고려하였으므로 설계업무에 효율적으로 적용될 수 있다고 판단된다.
- 4) 기존 이산화 최적화 과정에서 강뿔대구조물의 보부재 또는 기둥부재의 선정과정에서 문제가 되었던 국부최적화 문제를 극복할 수 있는 기준식을 제시하였다. 본 연구의 최적화 기준식을 강뿔대구조물의 최적설계에 적용한 결과 이산화최적화에 효율적이고 신뢰성있게 수렴함을 입증하였다.

참 고 문 헌

- (1) 김승익 (1997) "K-factor 설계방법의 평가", 대한토목학회 학술발표회 논문집, No 1, pp. 231-234
- (2) Liew, J. Y. R. and Chen, W. F. (1991) Refining the plastic hinge concept for advanced analysis/design of steel frames, J. Singapore Struct. Steel Soc., Steel Struct., 2(1), 13-28.
- (3) White, D.W. and Hajjar, J.F. (1991) Application of second-order elastic analysis in LRFD: research to practice, Eng. J., 28(4), 133-148.
- (4) Kim, S. E. and Chen, W. F. (1996c) Practical advanced analysis for unbraced steel frame design, J. Struct. Eng., ASCE 122(11).
- (5) American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design (1994) 2nd ed., Chicago, IL.
- (6) SAP2000. User's Guide.(1998) version 6.13, CSI Inc, Berkeley, California
- (7) 김승익 (1999) "횡비틀림좌굴을 고려한 강뿔대구조물의 고등해석기법 개발", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제1-3호, pp. 427-434
- (8) 장준호, 박문호, 김기홍, 임청권, (2000) "고등해석을 이용한 강뿔대구조물의 이산화 최적계", 대한토목학회 논문집, 제20권, 제1-호, pp. 87-95
- (9) Yura, J.A. (1988) Elements for teaching load and resistance factor design. University of Texas at Austin, TX, pp. 55-71
- (10) Ad Hoc Committee on Serviceability (1986) Structural serviceability: a critical appraisal and research needs, J. Struct. Eng., ASCE, 112(12), pp. 2646-2664.
- (11) Ellingwood (1989) Serviceability Guide-lines for Steel Structures, Eng. J., AISC, 26, 1st Quarter, pp. 1-8

(접수일자 : 1999년 11월 9일)