

# 고강도 강재를 사용한 건물골조방식 구조물의 구조비용 최적화

## Structural Cost Optimization for Building Frame System Using High-Strength Steel Members.

최상현\* · 권봉근\* · 김상범\*\* · 서지현\*\*\* · 권윤한\*\*\* · 박효선\*\*\*\*

Choi, Sang-Hyun · Kwon, Bong-Keun · Kim, Sang-Bum · Seo, Ji-Hyun · Kwon, Yun-Han · Park, Hyo-Seon

### ABSTRACT

This study presents a structural cost optimization method for building frame system using high-strength steel members. In, this optimization method, the material cost of steel member is involved in objective function to find the optimal cost of building frame systems. Genetic Algorithm is adopted to optimizer to find structural cost optimization. The proposed adapted to structural design of 35 stories example buildings with buildings frame systems. As a result, The proposed optimization method can be effectively adapted to cost optimization of building frame systems using high-strength steel members.

**Keywords** : Optimization, High-Strength steel, Structural Cost, Building Frame System

## 1. 서론

우리나라에서 1982년도에 압연 H형강이 생산되면서 철골 건물이 활성화되기 시작하였다. 그 후, 1990년대 중반에 이르러서는 30층 이상의 고층 건물의 수요가 증가하였고, 최근에는 60층 이상의 초고층 건물이 상당 수 건설되어 지고 있다. 강재 또한 1980년대의 SS400과 SM490으로부터 현재는 SM520TMCP, SM570TMCP 등과 같은 고강도강을 생산하기에 이르렀다. 건물의 높이가 높아짐에 따라 증가하는 하중을 부담하기 위해서 고강도강의 사용이 효과적인 것으로 기대되지만, 국내에서 건설되어지는 초고층 건물의 고강도강 사용은 상당히 제한적이었다. 초고층 건물에 대한 고강도강의 사용이 활성화되지 못한데는 고강도강의 경제성 문제와 설계자들의 인식 부족이 중요한 원인 중의 하나일 것이다. 그러므로 본 연구에서는 고층건물 설계시 사용할 수 있는 고강도강의 비용을 고려한 구조 비용 최적화 기법 개발을 통해, 고층건물 구조설계시 고강도강 사용에 대한 효율성과 경제성에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 연구 방법

- \* 연세대학교 건축도시공학부 석사
- \*\* 포항산업과학연구원 선임연구원, 공학박사
- \*\*\* 연세대학교 건축도시공학부 박사후과정
- \*\*\* 연세대학교 건축도시공학부 부교수

### 2.1 연구 범위

본 연구는 건물 골조 방식의 구조물의 기둥을 대상으로 최적화 기법을 도입하여, 고강도강의 비용최적화를 목적으로 한다. 건물 골조 방식의 구조물에서 기둥은 횡력에 직접 저항하지 않으며, 주로 연직하중만을 부담하도록 설계된다. 건물 골조 방식에서는 기둥의 강성 변화에 따른 구조물의 강성과 부재력의 변화는 크지 않으므로, 최적화 기법 적용시 기둥의 부재력은 일정한 것으로 가정하고, 기둥열별로 최적화 기법을 적용하였다.

최적화 기법 적용시 SRC 기둥 부재의 데이터 베이스는 SM490 Roll 부재 23개, SM490 Built-up 부재 31개, SM490TMC 부재 132개, SM520TMC 부재 163개, SM570TMC 부재 163개를 이용하여 총 512개의 SRC 데이터 베이스를 구축하였다. SRC 데이터 베이스에서 콘크리트의 피복 두께를 150~230mm 내외로 고정하였으며, SRC 부재 데이터 베이스의 합성 단면적과 합성 단면 1차 모멘트와의 관계는 그림 1과 같다.

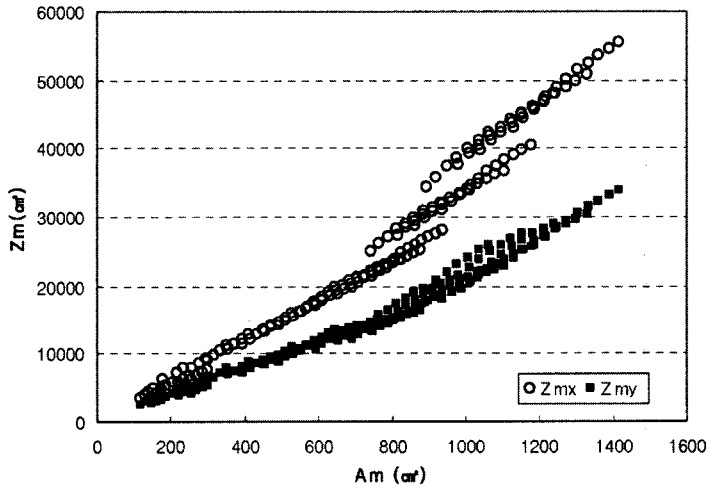


그림 1. SRC 부재 데이터 베이스의 단면 성능

### 2.2 최적화 알고리즘

본 연구에서는 개념이 단순하고 유연성이 높은 단순 유전알고리즘(Simple Genetic Algorithm, SGA)을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 최적화 알고리즘에서 사용하는 단순 유전 알고리즘은 500개의 개체수와 0.6의 교차율을 사용하였다. 또한 돌연변이율이 0.05 이상일 경우 그 세대의 최고 적응도를 갖는 개체가 다음 세대에 생존하기 어렵다는 연구를 토대로, 0.03의 돌연변이율을 사용한다.

### 2.3 구조 정식화

본 논문에서 사용된 목적함수, 설계변수, 제약조건은 아래와 같다. 목적함수는 강재의 물량에 강중에 따른 비용을 곱한 강제 비용을 최소화하는 것으로 한다.

$$\text{Minimize } f(X) = \sum_{i=1}^M A^i L^i \rho \text{Cost}^i \quad (1)$$

여기서,

- |        |                    |                 |                       |
|--------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| $f(X)$ | : 목적함수(기동열의 가격)    | $L^i$           | : $i$ 번째 부재의 길이       |
| $\rho$ | : 철 밀도             | $\text{Cost}^i$ | : $i$ 번째 부재의 단위길이당 단가 |
| $A^i$  | : $i$ 번째 부재의 강제 면적 |                 |                       |

제약함수는 응력에 대한 제약, 시공성에 대한 제약, 강재의 강종에 대한 제약으로 구성된다. 응력에 대한 제약은 SSRC79를 따랐으며, 식 (2)와 같이 응력비가 1.0을 초과하지 않도록 제한하였다. 시공성에 대한 제약은 식 (3)과 같이 상부 부재의 콘크리트 사이즈가 하부 부재의 콘크리트 사이즈 보다 크지 않도록 제한한 것이며, 강종에 대한 제약은 식 (4)와 같이 강재의 상부 부재 강도가 하부 부재 강도보다 크지 않도록 제한한 것이다.

$$\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} \leq 1.0 \quad i=1, \dots, M \quad (2) \qquad \frac{A^{i+1}}{A^i} \leq 1.0 \quad i=1, \dots, J \quad (3)$$

$$\frac{F_{ys}^{i+1}}{F_{ys}^i} \leq 1.0 \quad i=1, 2, \dots, J \quad (4)$$

여기서,

- |        |                 |                     |                       |
|--------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| $M$    | : 기동열의 총 부재 개수  | $\sigma_{allow}^i$  | : $i$ 번째 부재의 허용응력     |
| $J$    | : 기동열의 총 접합부 개수 | $\sigma_{actual}^i$ | : $i$ 번째 부재의 실제응력     |
| $F(X)$ | : 가목적함수 (적합도)   | $F_{ys}^i$          | : $i$ 번째 부재의 철골의 항복응력 |

위와 같은 제약 최적화 문제를 벌칙 함수를 이용하여 식 (5)와 같은 적합도함수(가 목적함수)로 표현할 수 있다. 적합도 함수는 목적함수와 벌칙함수 및 벌칙 상수로 구성되어 진다.

$$\text{Maximize } F(X) = C_{\max} - \{\tilde{f}(X) + \gamma \tilde{p}(X)\} \quad (5)$$

여기서,

$$\tilde{f}(X) = \frac{f(X)}{\{f(X)\}_{\max}} = \frac{\sum_{i=1}^M A^i L^i \rho \text{Cost}^i}{\sum_{i=1}^M A_{\max}^i L_{\max}^i \rho \text{Cost}_{\max}^i} \quad (6)$$

$$\tilde{p}(X) = \max\left(0, \frac{\tilde{g}(\sigma) + \tilde{g}(A) + \tilde{g}(F_{ys})}{3}\right) \quad (7)$$

$$\tilde{g}(\sigma) = \frac{\sum_{i=1}^M \max\left(\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} - 1.0, 0.0\right)}{\left\{\sum_{i=1}^M \max\left(\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} - 1.0, 0.0\right)\right\}_{\max, k}} \quad (8)$$

$$\tilde{g}(A) = \frac{\sum_{i=1}^J A^i}{J} \quad (9)$$

$$A^i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{A^{i+1}}{A^i} \leq 1 \\ 1 & \text{if } \frac{A^{i+1}}{A^i} > 1 \end{cases} \quad E_{ys}^i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{F_{ys}^{i+1}}{F_{ys}^i} \leq 1 \\ 1 & \text{if } \frac{F_{ys}^{i+1}}{F_{ys}^i} > 1 \end{cases} \quad (10, 11)$$

$$\tilde{g}(F_{ys}) = \frac{\sum_{i=1}^J E_{ys}^i}{J} \quad (12)$$

여기서,

- $C_{\max}$  : 최소화 문제를 최대화 문제로 전환하기 위한 상수
- $\tilde{f}(X)$  : 정규화된 목적함수
- $\{f(X)\}_{\max}$  : 목적함수의 최대값
- $\tilde{g}(A)$  : 기둥단면에 관한 정규화된 시공성 제약조건 함수
- $\tilde{g}(F_{ys})$  : 항복응력에 관한 정규화된 시공성 제약조건 함수
- $\{\}_k$  :  $k$ 번째 개체의 값
- $\gamma$  : 벌칙상수
- $\tilde{p}(X)$  : 정규화된 벌칙함수
- $\tilde{g}(\sigma)$  : 정규화된 응력제약조건 함수

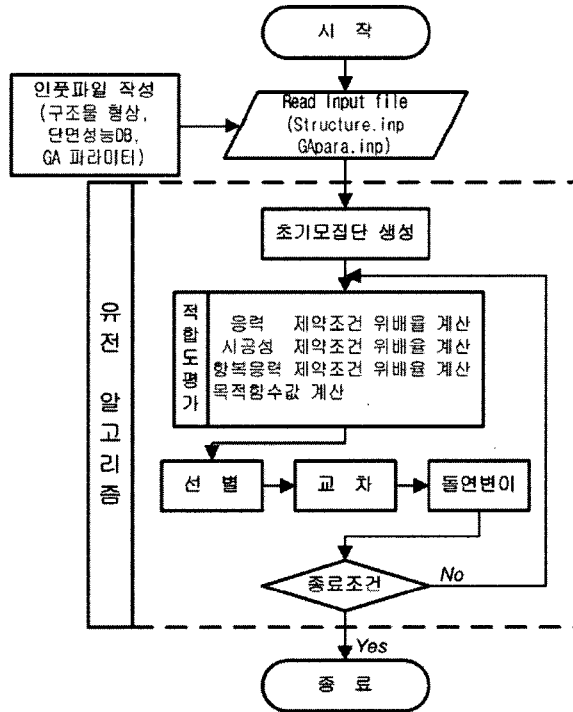


그림 3. 유전알고리즘을 이용한 최적화 과정

### 3. 예제 적용

#### 3.1 예제 설명

그림 2는 예제로 사용된 건물은 지상 35층, 지하 6층의 건물 골조 방식의 주상 복합 건물로서 기둥은 SRC로 설계되었다. 기둥의 콘크리트 강도는  $204 \sim 270 \text{ kgf/cm}^2$ 을 사용하였으며, SRC 부재는 KBC 2005에 따라 설계되었다. 최적화는 기둥별 별로 200개의 모집단을 랜덤으로 생성하여 모집단 종료 조건을 만족하는 feasible영역에서 최고의 적합도 값을 가지는 모집단을 최종해로 선택하였다. 강종에 따른 강재의 강도는 표 1과 같다. 강종에 따른 비용은 강재 제작사에서 제공한 자료를 따랐다. 그림 3은 본 연구에서 제안하는 최적화 알고리즘을 나타내는 순서도 이다.

표 1. 강종에 따른 항복 응력값

		(단위 : N/mm <sup>2</sup> )		
관두께	강 종	SM490	SM520TMC	SM570TMC
	$0 \text{ mm} < \max(t_w, t_f) \leq 40 \text{ mm}$	325 (3316 $\text{kgf/cm}^2$ )	355 (3622 $\text{kgf/cm}^2$ )	440 (4490 $\text{kgf/cm}^2$ )
	$40 \text{ mm} < \max(t_w, t_f)$	295 (3010 $\text{kgf/cm}^2$ )		

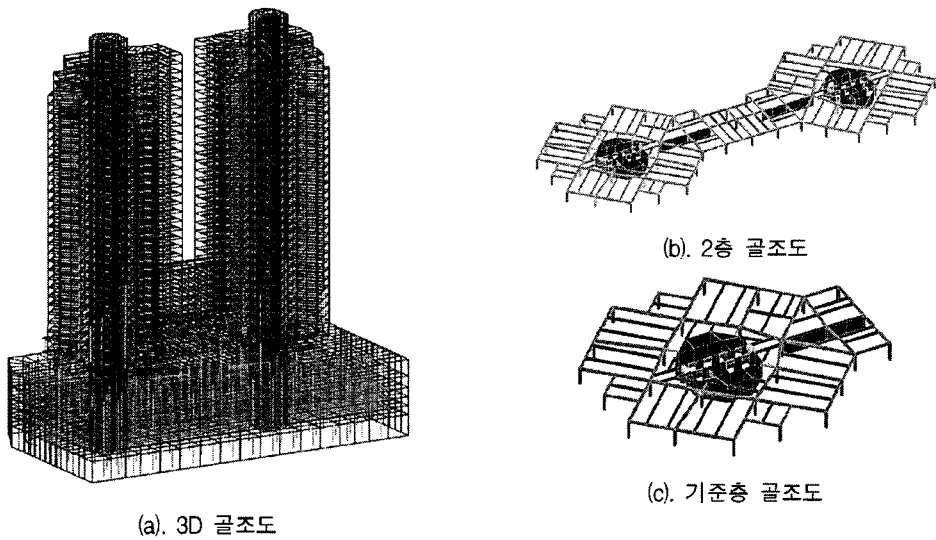


그림 2. 예제 구조물

#### 3.2 결과

그림 4은 단순 유전알고리즘의 파라미터 스터디를 통해 최종 결정된 파라미터를 이용하여 동일한 조건으로 다섯 번 반복하였을 때의 수렴 곡선을 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 동일한 조건으로 다섯 번 반복하여 최적화를 수행한 결과가 비슷하다는 것을 통해서 개발된 최적화 알고리즘은 충분한 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 기둥별 18개에 대한 수렴 곡선을 나타낸다. 표 2는 최적화 과정을 통해서 얻어진

기동열별 강재 가격을 나타낸다. 각 기동열별 강재 가격은 안정적으로 수렴되는 경향을 보이며, 평균 응력비는 82% 수준이다. 그림 6은 기동열별 강재의 종류를 나타내는 그래프이다. 저층부에서는 주로 SM570TMC가 선택되었으며, 중층부와 상층부에서는 SM520TMC와 SM490Roll 부재가 선택되었음을 알 수 있다.

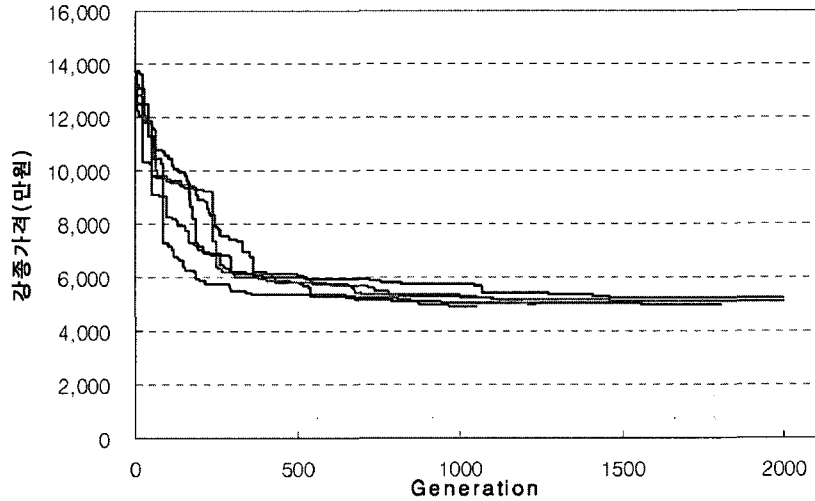


그림 4. 최적화 알고리즘의 안정성

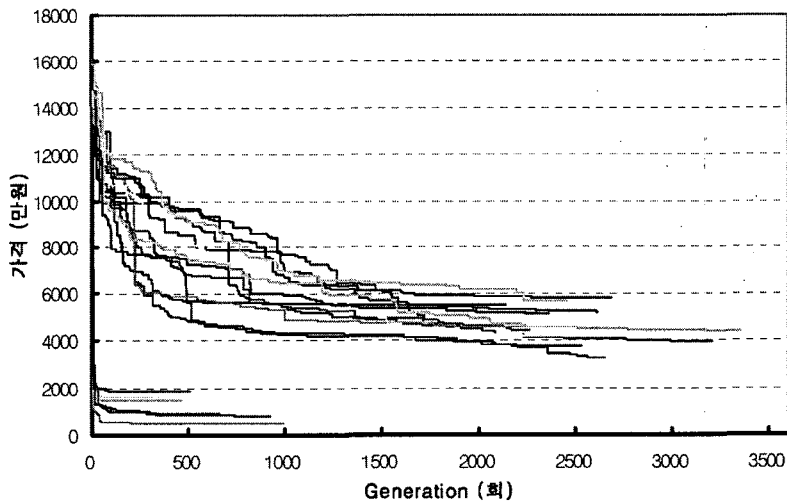


그림 5. 기동열별 가격 수렴곡선

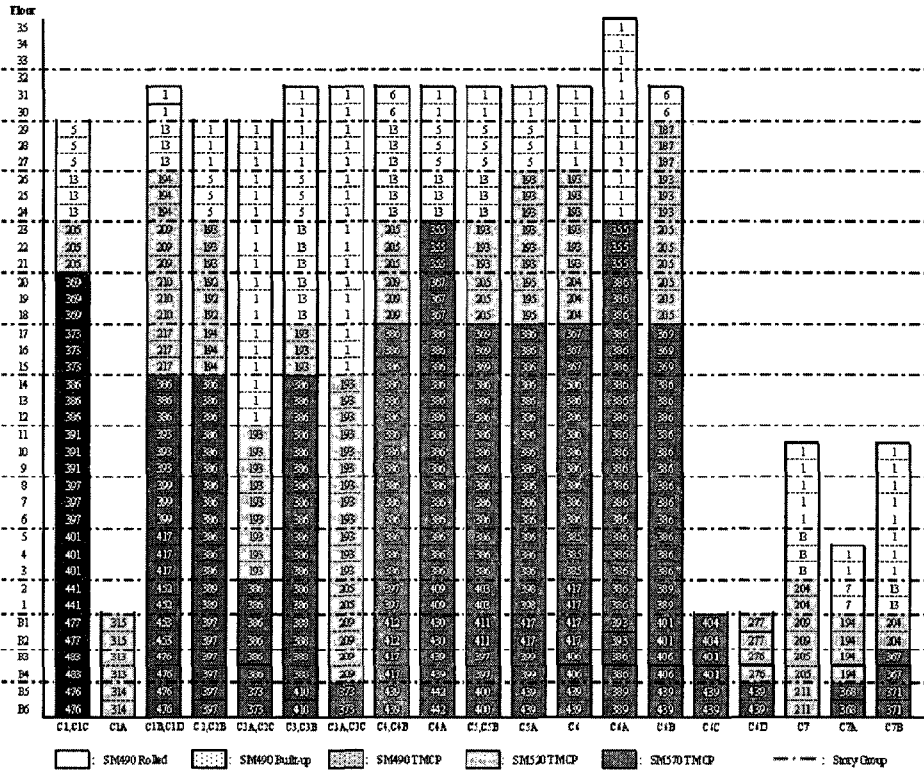


그림 6. 기둥열별 강종별 최적화안

표 2. 최적화 결과

기둥종류	개수	가격(원)	용력비	기둥종류	개수	가격(원)	용력비
C1,C1C	4	49,509,279	94.0	C5A	4	41,309,620	81.3
C1A	3	18,639,521	97.1	C6	2	40,581,929	87.9
C1B,C1D	3	52,938,682	93.1	C6A	4	37,724,312	51.4
C2,C2B	7	33,889,174	80.3	C6B	2	39,898,110	88.4
C2A,C2C	2	17,236,364	63.2	C6C	2	15,002,479	95.3
C3,C3B	4	33,191,581	77.0	C6D	2	15,713,891	94.4
C3A,C3C	2	13,612,643	62.3	C7	1	8,052,409	81.6
C4,C4B	3	42,796,199	84.2	C7A	1	4,707,720	89.3
C4A	4	43,467,744	85.1	C7B	1	6,170,695	69.9
C5,C5B	5	38,153,502	85.1	-	-	-	-
계				56		1,894,946,731	82.1

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 고층 건물 구조설계 시 적용할 수 있는 강제 단가를 고려한 고층 건물 구조 비용 최적화 기법을 Genetic Algorithm을 이용하여 개발하였다. 개발된 구조 비용 최적화 기법을 실제 설계된 주상 복합 예제에 적용한 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 개발된 비용 최적화 기법을 적용한 결과, 평균 응력비 82% 수준을 유지하며, 구조비용이 안정적으로 최적화 되는 것을 알 수 있었다.

② 강중 제약 조건에 의해서 구조물의 높이에 따라 저층에서는 고강도강이 고층부로 갈수록 일반강도 강이 선택되고 있음을 알 수가 있었다. 이는 본 예제에 대해서는 고강도강을 저층부에 사용하는 것이 유리하다는 것을 보여준다.

이와 같은 결과를 통해서 개발된 고층 건물 철골 구조비용 최적화 기법은 건물 골조 방식의 건물의 강제 비용 최적화에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 강중에 따른 강제의 가격만을 고려하였으나 향후에는 SRC 기둥의 콘크리트에 대한 비용도 고려한 최적화 기법을 개발하면 좀 더 합리적인 최적 설계안이 만들어 질 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정연구개발사업 국가지정연구실(2005-01504) 사업의 연구비 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Takao Nishikawa (2005) Recent Trend of Structural Design of High-Rise Buildings in Japan, *대한건축학회 학술발표대회(창립60주년 기념) 논문집, v.25 n.1*
- 임성우, 장인화 (2003) 고장력(SM570) 강재의 기동제 특성에 관한 연구, *한국강구조학회 논문집, v.15 n.1*
- 장인화 (2002) 고강도강의 건축 구조 적용, *초고층 구조시스템의 새로운 방향(대한건축학회 세미나)*
- Holland, J. H. (1975) Adaptation in natural and artificial system, *Univ. Michigan Ann Arbor, MIT*
- De Jong, K. A. (1975) An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, *Doctoral Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan*
- Structural Stability Research Council (1979) A Specification for the Design of Steel-Concretet Composite Columns, *Engineering Journal 4th Quarter 1979, pp.101-115*