

고강도강재의 효율적 사용을 위한 초고층건물의 최적설계기법

Structural Optimization of High-rise Buildings using High-strength Steels

서지현† 권봉근** 김상범*** 박효선*
Seo, Ji-Hyun Kwon, Bong-Keun Kim, Sang-Bum Park, Hyo-Seon
(논문접수일 : 2009년 4월 9일 ; 심사종료일 : 2009년 6월 15일)

요지

최근 국내에서 400~600MPa급의 구조용 고강도강재가 생산되고 있으며, 큰 하중을 부담해야 하는 초고층건물에는 고강도강재의 사용이 효과적일 것으로 예상되나, 고강도강재의 적절한 사용법 및 적용사례 부족으로 인해 고강도강재는 일부 건축물에서 제한적으로 사용되고 있다. 그럼으로 본 연구에서는 고강도강재를 초고층건물에 이용할 수 있는 방법으로 최적화기법을 이용한 초고층건물 구조비용 최적설계기법을 개발하였다. 개발된 최적설계법은 강재의 강종별 재료 가격을 고려하며 강재의 강도와 크기를 결정함으로써 구조비용을 최소화 시킬 수 있다. 제안된 구조비용 최적설계법을 6개의 실제 초고층건물 구조설계에 적용하였으며, 경험에 의존한 구조 설계를 병행하여 개발된 최적설계법의 효율성과 적용성을 평가하였다. 개발된 초고층건물 구조비용 최적화기법은 경험에 의존한 설계에 비해 7~21%정도의 구조비용을 절감할 수 있었다. 또한, 제안된 최적설계법의 적용결과로서 얻어진 강재의 강도분포와 강종별 재료비용의 분석을 통해서 고강도강재를 초고층건물에 효과적으로 적용하기 위한 간략한 가이드라인을 제시하였다.

핵심용어 : 구조비용최적화, 고강도강재, 초고층건물, 유전알고리즘

Abstract

Recently, the high-strength steel of 400~600MPa tensile strength is producing in the country. Use of high-strength steel member in the design of high-rise buildings is expected to increase the efficiency of structural design in the aspect of structure material weight and cost, however it has been used only a narrow extent. No efficient design method to use high-strength steel in the design of high-rise buildings has been developed. Therefore, in this study structural cost optimization technique that can minimize the structural material cost of high-rise buildings using high-strength steels is developed. The efficiency of the technique is evaluated by comparing the experience-based design for 6 high-rise building examples. As a result, the proposed techniques can save 7~21% of structural material cost compared with experienced-based design. And also, the rough guideline for effective use of high-strength steels in the structural design of high-rise buildings is introduced on the basis of results.

Keywords : structural cost optimization, high-rise buildings, high-strength steel, genetic algorithm

1. 서론

강재와 콘크리트는 현대 건축물에서 가장 널리 사용되는 구조 재료이다. 세계 초고층학회(CTBUH)의 자료에 따르면 1981년 이전까지는 세계 10대 초고층건축물은 모두 강재로 건설되었으며, 1982년에 Texas Commerce Tower(Houston, USA)가 순수 강재가 아닌 합성 구조로서 처음으로 세계 10대

초고층에 포함되었으며, 1992년에는 철근 콘크리트 지어진 Central Plaza(Hong Kong, China)가 세계 10대 초고층에 포함되었다. 그 이후 세계 10대 초고층건축물 순위에서 철근콘크리트나 합성 구조 건축물들의 비중이 높아졌으며, 2008년에는 10대 초고층건축물 중 강재 건축물은 불과 2개에 불과하게 되었다. 세계 10대 초고층건축물에서 강 건축물(steel structure)의 비중이 감소하는 것은 구조 재료의 강도 변화와

† 책임저자, 정회원 · GS건설(주) 기술연구소 선임연구원

* 교신저자, 정회원 · 연세대학교, 건축공학과 교수

Tel: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668

E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 중앙도서관 전문사서

*** 정회원 · 포항산업과학연구원 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

도 관련이 있다. 1980년 20MPa정도이던 콘크리트의 압축 강도는 그 후 급격히 증가하여 1990년대는 50MPa, 2000년대에는 100MPa까지 증가하였으며, 현재 초고층건물 현장에서도 60~70MPa급의 콘크리트 사용을 어렵지 않게 볼 수 있다. 이에 반해 강재의 인장강도는 1980년대 400MPa정도에서 2000년대에는 600MPa정도로 20년 동안 인장 강도가 1.5배 정도 증가하였으나, 콘크리트의 강도 증가율은 따라 가지 못한다. 이처럼 세계 10대 초고층건축물 중에서 강재 건축물(Steel structure)의 비율이 감소하고 있으나 강재는 장스팬으로 인한 다양한 형태와 공간 창출 능력, 급속한 시공 속도 및 우수한 내진 성능 등의 장점으로 인해 여전히 매력적인 초고층 건축물의 구조 재료이다. 국내에서도 SM520TMCP, SM570TMCP를 넘어 800MPa급의 고강도 구조용강재가 생산될 예정이다. 이처럼 국내에서 고강도강재의 공급적인 문제는 해결이 되었지만 실제 초고층건물에서는 고강도강재는 극히 제한적으로 사용되고 있다. 고강도강재에 대한 이해 및 적용 사례 부족, 고강도강재의 경제성에 대한 불확실성 등이 초고층건물 설계에서 고강도강재의 적용을 주저하게 하는 요인이 되고 있다. 고강도강재의 적용 사례와 적용 방법에 대한 자료가 많지 않은 상황에서 설계자의 경험과 직관에 의존하여 초고층건물의 적절한 강재 강도와 부재 성능을 결정하고 고강도강재의 경제성을 평가하는 것은 쉽지 않은 일이다.

최근에 고강도강재에 대한 연구가 진행되고 있으나, 대부분의 연구가 고강도강재의 재료 성능이나 접합부의 성능 평가에 치중되어 있으며, 고강도강재를 효과적으로 사용하는 방법에 대한 연구는 많지 않다. 일본에서 20층 오피스 건물을 대상으로 490MPa급 강재를 590MPa급 강재로 대체할 경우 강재 량을 12% 절감할 수 있다는 연구 결과가 발표되었다(Takao, 2005). 이 연구에서 20층 건물을 대상으로 얻어진 결과가 초고층건물에서 그대로 적용되기는 어려우며, 전체 강재 량은 감소하더라도 고강도강재의 재료비용이 상대적으로 높기 때문에 전체 구조비용은 오히려 증가할 수도 있다. 이처럼, 초고층건물에서 실무 설계자가 다양한 강도와 강종을 조합해서 설계를 하는 것은 현실적으로 시간과 비용이 많이 소요되는 작업이며, 고강도강재의 효율적인 사용에 대한 가이드라인이 거의 없기 때문에 개별 프로젝트마다 시행착오를 겪으며 경험적으로 설계하고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 고강도강재를 초고층건물에 효과적으로 적용할 수 있는 방안으로, 최적화기법을 이용한 초고층건물 구조비용 최적설계법을 개발하였다. 개발된 최적설계법은 6개의 초고층건물 예제에 적용하였으며, 경험에 의존한 설계를 병행하여 개발된 최적설계법의 경제성 및 효율성을 평가하였다. 또한, 6개의 예제 적용을 통해 얻어진 결과 분

석을 통해 초고층건물 설계시 고강도강재의 효율적인 적용을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구 범위

본 연구에서는 초고층건물 설계시 최적화기법을 도입하여 적절한 강재의 강도와 단면 성능을 결정함으로써 초고층건물의 구조비용을 최소화할 수 있는 구조비용 최적설계법을 개발하였다. 본 연구는 고강도강재를 초고층건물에 효과적으로 적용할 수 있는 방법을 제안한 것이므로 기둥만을 최적 설계 대상으로 하며, 코어와 처짐의 문제가 발생할 수 있는 거더는 최적화 대상에서 제외하였다. 즉, 정해진 구조 시스템에서 기둥의 강재 강도와 부재 성능을 변수로 하여 구조비용을 최소화하였다. 초고층건물은 부정정이므로 부재 성능 변경에 따라 부재력이 변하므로 구조 해석과 설계가 반복적으로 이루어져야 하나, 초고층건물의 부재력은 주로 부재의 위치와 하중의 크기 따라 결정되므로, 본 연구에서는 기둥의 강성이 변경되더라도 기둥의 부재력은 변화가 없는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 최적화 과정에서 기둥의 부재력 계산을 위한 반복적인 구조해석을 피할 수 있게 해준다(Baker, 1990; Charney, 1991; Park, 2002).

표 1 부재 데이터베이스

Steel Type	No.	Steel Series	H (mm)	B (mm)	tw (mm)	tf (mm)
SM490 Roll (23개)	1	200	200.0	200.0	8.0	12.0

SM490 Built-up (31개)	23	400	428.0	407.0	20.0	35.0
	24	300	300.0	300.0	10.0	15.0

	40	350	350.0	350.0	30.0	30.0
SM490 TMCP (132개)	...	...	...	...	...	...
	54	400	440.0	400.0	35.0	35.0
	55	400	450.0	400.0	20.0	40.0

SM520 TMCP (163개)	110	400	530.0	400.0	70.0	80.0

	186	600	730.0	600.0	80.0	80.0
SM570 TMCP (163개)	187	300	300.0	300.0	10.0	15.0

	280	500	590.0	500.0	50.0	60.0
SM570 TMCP (163개)	...	...	...	...	...	...
	349	600	730.0	600.0	80.0	80.0
	350	300	300.0	300.0	10.0	15.0

SM570 TMCP (163개)	420	400	510.0	400.0	60.0	70.0

	512	600	730.0	600.0	80.0	80.0

최적화 과정에서 기둥은 표 1과 같이 구축된 철골 부재 데이터베이스에서 부재를 선택하게 된다. 매입형 합성(이하 SRC) 기둥의 경우에는 SRC 기둥의 외부 크기와 콘크리트의 강도 및 철근량은 설계 사무소의 설계안과 동일하게 유지하며, SRC 기둥의 철골 부재만을 최적화 알고리즘을 이용하여 데이터베이스에서 선택하여 SRC 기둥을 형성하게 된다. 작성된 철골 부재 데이터베이스는 SM490Roll 부재 23개, SM490Built-up 부재 31개, SM490TMCP 부재 132개, SM520TMCP 부재 163개, SM570TMCP 부재 163개 등 총 512개의 H 형강으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 6개 초고층건물을 대상으로 구조비용 최적설계법의 개발과 더불어 설계 사무소에서 경험에 의존한 설계를 병행하였다. 설계 사무소에서는 주로 SM570TMCP강을 사용하여 설계하였으며, 일부 부재는 SM490Roll강을 사용하여 설계하였다. 설계 사무소에서 경험에 의존한 설계 결과와 최적설계법으로 얻은 결과를 기둥의 강재와 콘크리트의 비용 및 부재 응력비 등을 비교하는 방식으로 최적화 기법의 경제성 및 적용성을 평가하였다. 또, 최적화 기법으로 얻은 강재와 콘크리트의 비용, 부재 응력비 및 강재의 강도 분포를 분석하여 초고층건물에 대한 고강도강재의 효율적 사용을 위한 간략한 가이드라인을 제시하였다.

3. 최적화 기법

3.1 유전자 알고리즘

초고층건물 비용 최적설계기법의 최적화 기법으로, 발전적 기법(Heuristic Method) 중에서 해의 탐색 능력이 우수하며 많은 설계 변수와 제약이 많은 대형 수리 문제에 적합한 것으로 알려진 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 선택하였다. 유전 알고리즘은 1975년 Holland의 논문에서 처음 소개되었으며, 생물의 진화과정인 자연 선별과 유전 법칙을 모방한 확률적 탐색기법으로 현재 다양한 유전자 알고리즘이 개발되고 있으나, 본 연구에서는 개념이 단순하고 유연성이 높은 것으로 알려진 단순 유전 알고리즘(Simple Genetic Algorithms, SGA)을 사용하였다(박효선 등 2006; 서지현 등 2009). 단순 유전 알고리즘은 Goldberg가 제안한 것으로서 해의 영역에 따라 적절한 파라미터의 결정이 필요하다. 본 연구에서 단순 유전 알고리즘의 파라미터는 De Jong이 제시한 Standard Parameter Setting을 기초로 하여 설정하였다(De Jong, 1975). 다양한 영역의 탐색을 위하여 교차율은 0.4에서 0.8 사이의 값을 사용해야한다는 De Jong의 연구결과에 의해 0.7을 교차율(Cross-over ratio)로 사용하였다. 그리고 돌연변

이율이 0.05이상일 경우 그 세대의 최고 적응도를 갖는 개체가 다음 세대에 생존하기 어렵다는 연구를 토대로, 본 연구에서는 돌연변이율은 0.03으로 설정하였다. 300개의 개체를 생성하여 초기 모집단을 생성하였으며, 세대(Generation)를 거치면서 제약 조건을 만족하며 적합도가 가장 높은 개체를 엘리트 개체로 정의하여 최적해의 후보로 사용하였다. 종료 조건은 모집단의 가용해 비율이 10% 이상이고 동일 엘리트 개체가 500세대 이상 지속되거나 최대 세대 수가 20,000회 일 경우로 설정하였다.

3.2 정식화

최적화 기법을 적용하기 위해서 구조 문제를 수학적 문제로 표현하는 정식화 과정이 필요하다. 본 연구에서 목적함수는 강종의 재료비용을 고려하여 기둥 열별 강재 비용을 최소화하는 것으로서 식 (1)과 같이 표현된다. 최적화 과정에서 SRC 기둥의 콘크리트의 크기와 강도 및 철근량은 설계 사무소에서 경험에 의한 설계안과 동일하므로 목적함수에는 포함되어 있지 않다.

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

여기서, A , L , ρ , C 는 각각 철골 부재 단면적, 부재 길이, 철의 밀도, 강종을 고려한 부재별 단위 무게당 재료 가격을 나타낸다. $f(X)$ 는 기둥 열별 강재 비용을 나타내며, i , M 은 각각 특정 기둥 열에서 i 번째 부재와 해당 기둥열의 기둥 부재수를 나타낸다. 제약함수는 응력에 대한 제약, 시공성에 대한 제약 및 인접 층간의 강재 항복 강도 제약조건으로 식 (2)~(4)와 같이 표현된다.

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

$$t_{min} \leq t^i = \text{MAX} \left[\frac{H_c^i - H_s^i}{2}, \frac{B_c^i - B_s^i}{2} \right] \leq t_{max} \quad i = 1, \dots, M \quad (3)$$

$$\frac{F_y^{i+1}}{F_y^i} \leq 1.0 \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

여기서, σ_{actual} , σ_{allow} 는 각각 부재 응력과 재료의 허용 응력을 나타낸다. t , H , B 는 철골 피복 두께와 부재 초과 폭을 나타내며, 하 첨자 c , s 는 콘크리트와 철골, 하 첨자 max , min 은 최대, 최소를 나타낸다. F_y 는 강재의 항복응력을 나타내며, M 은 해당 기둥열의 기둥 수, 상 첨자 i 는 특정 기둥 열에서 i 번째 부재 혹은 층수를 나타낸다. 위와 같은 제약

최적화 문제는 벌칙 상수를 이용하여 식 (5)와 같은 가 목적 함수 형태의 적합도함수로 표현된다. 제약 조건의 항목과 크기에 대한 고려 없이 벌칙함수를 구성하면 특정 제약조건의 영향이 적합도에 지배적인 영향을 미칠 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 식 (6)~식 (14)과 같은 정규화 된 벌칙함수를 도입하였다.

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

여기서,

$$\tilde{f}(X) = \frac{f(X)}{\{f(X)\}_{\max}} \quad (6)$$

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

$$\tilde{g}(\sigma) = \frac{g(\sigma)}{g_{\max}(\sigma)} \quad (8)$$

$$g(\sigma) = \sum_{i=1}^M \max\left(\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} - 1.0, 0.0\right) \quad (9)$$

$$g_{\max}(\sigma) = \max\{g_j(\sigma) \quad j = 1, \dots, np\} \quad (10)$$

$$\tilde{g}(N_t) = \frac{\sum_{i=1}^M N_t^i}{M} \quad (11)$$

$$N_t^i = \begin{cases} 0 & \text{if } t_{\min} \leq t^i \leq t_{\max} \\ 1 & \text{if } t_{\min} \geq t^i \text{ or } t^i \geq t_{\max} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, M \quad (12)$$

$$\tilde{g}(N_F) = \frac{\sum_{i=1}^M N_F^i}{M} \quad (13)$$

$$N_F^i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{F_y^{i+1}}{F_y^i} \leq 1 \\ 1 & \text{if } \frac{F_y^{i+1}}{F_y^i} > 1 \end{cases}, \quad i = 1, \dots, M \quad (14)$$

여기서, $F(X)$, $\tilde{f}(X)$, $\tilde{p}(X)$, r 는 각각 적합도함수, 정규화 된 목적함수, 정규화 된 벌칙함수 및 벌칙상수를 나타내며, C_{\max} 는 목적함수의 최소화 문제를 적합도의 최대화 문제로 전환하기 위한 상수로서 본 연구에서는 $C_{\max} = 10$ 이 사용되었다. $f(X)$, $\{f(X)\}_{\max}$ 는 특정 기둥 열에서 목적함수와 목적함수가 가질 수 있는 최대 값을 나타낸다. $\tilde{g}(\sigma)$, $\tilde{g}(N_t)$, $\tilde{g}(N_F)$ 는 정규화 된 응력제약 조건 위배 율 함수, 정규화 된 강재 피복 두께 제약 위배 함수 및 정규화 된 강재 항복 강도 제약 위배 함수를 나타낸다. 또한, $g(\sigma)$, $g_{\max}(\sigma)$ 는 각각 응력 제약 조건 위배 율 함수와 현 세대에서 개체 중 응력 제약 조건 위배 함수의 최대 값을 나타내며, np 는 모집단의 수를 나타낸다. N_t , N_F 는 강재 피복 두께 제약 위배 개수와 강재 항복강도 제약 위배 개수를 나타내며, t , F_y 는 강재의 피복 두께와 강재의

항복강도를 나타낸다. 또한 t_{\max} , t_{\min} 은 강재의 피복 두께의 최대 값과 최소 값을 나타내며, $i, i+1$ 은 i 층과 인접한 상부 $i+1$ 층을 나타내며, M 은 기둥 열별 기둥 개수를 나타낸다.

3.3 최적화 기법 적용 원칙

본 연구에서 목적함수에 사용된 강종별 재료 가격은 표 2와 같다. 목적함수에는 강관 두께와 강재 제작비가 고려된 강종별 강재 가격을 고려하여 산정된다. 최적화 과정에서 기둥 부재는 작성된 표준 부재 데이터베이스 내에서 선택하게 된다. 기둥이 SRC 기둥인 경우에는 설계 사무소에서 결정된 콘크리트 단면의 크기와 강도 및 철근량은 설계 사무소 안과 동일하게 유지하며 유전자 알고리즘으로 데이터베이스에서 선택된 철골 부재를 이용하여 SRC 기둥을 형성하였다. 이때, 최적화 기법에서는 식 (2)~식 (4)와 같은 응력 제약, 인접 층간의 강종 제약, 철골 피복 두께 제약 등이 적합도에 반영되도록 구성되어 있다. 식 (2)에 표현된 매입식 합성 기둥의 철골 피복 두께는 예제 적용시 124~250mm를 유지하도록 설정하였다. 순수 강재 기둥일 경우에는 식 (2), 식 (4)에서 표현된 응력과 인접층 간의 강종만을 제약하였다. 일부 예제에서 의도적으로 SM490Roll 강재를 사용한 기둥은 최적화 기법에서 SM490Roll 강종이 선택되도록 하였다.

본 연구에서 유전자 알고리즘은 300개의 모집단을 생성하고, 이를 교배 및 돌연 변이 과정을 거치면서 모든 제약 조건을 만족하며 최소의 목적함수를 가지는 개체를 엘리트 개체로 정의하여 최적해의 후보 해로 선정하였다. 일반적으로 시공 및 설계 편의상 구조 부재는 수직 및 수평 그룹핑이 되

표 2 강종별 강재 가격

(원/ton)

강 종	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	강관두께 (mm)	제작비포함 (원/ton)	후판가격 (원/ton)
SM490 Roll and Built-up	490	325*	0 < t ≤ 25	897,100	727,100
			25 < t ≤ 38	905,800	735,800
			38 < t ≤ 50	913,700	743,700
			50 < t ≤ 100	923,100	753,100
SM490 TMCP	490	325	0 < t ≤ 25	919,700	749,700
			25 < t ≤ 38	928,400	758,400
			38 < t ≤ 50	936,300	766,300
SM520 TMCP	520	355	0 < t ≤ 25	928,400	758,400
			25 < t ≤ 38	937,800	767,800
			38 < t ≤ 50	945,700	775,700
			50 < t ≤ 100	953,600	783,600
SM570 TMCP	570	440	0 < t ≤ 50	1,037,600	867,600
			50 < t ≤ 100	1,045,500	875,500

* 두께 40mm 이하는 295MPa

표 3 콘크리트 압축 강도별 가격 (만원/m³)

콘크리트 종류(MPa)	21	24	27	30	35	40	50
가격	51.8	54.3	56.8	59.7	61.8	73.3	87.0

어 있으며 이 연구에서도 부재의 수직 및 수평 그룹핑은 구조 설계사무소에서 결정된 그룹핑을 따르고 있다. 경험에 의존하여 강종과 부재 성능을 함께 결정하는 것은 어려운 작업이므로, 구조 설계사무소에서는 주로 SM570TMC강을 사용하여 설계하였다. SRC 기둥의 콘크리트 가격은 전체 부재 단면적에서 철골과 철근 단면적을 제외한 순수 콘크리트 단면에 높이 및 표 3과 같은 강도별 콘크리트 재료 가격을 고려하여 산정하였다.

4. 예제 적용

그림 1은 본 연구에서 사용된 예제 건물들의 골조도와 기준층 평면 개념도를 나타낸다. 표 4는 예제로 사용된 건축물에 대한 층수, 높이, 타워부 평면 크기, 구조 시스템, 횡 하중과 기둥열 수 및 기둥열의 그룹수를 나타낸다.

4.1 A 빌딩 적용결과

최적화 기법 적용 시 기둥의 수직 그룹핑은 설계 사무소와 동일하며, A 빌딩은 1~8개 층이 한 그룹으로 설정되었으며 기둥 열 별로 최대 8개의 수직 부재 그룹핑을 가진다. 각 수직 부재 그룹은 표준 데이터베이스의 512개 단면 성능을 선택할 수 있으므로 총 512⁸이라는 경우의 수를 가지게 된다. 이 경우 어떠한 위치에 어떠한 강종과 단면 성능을 선택할 것인가를 선택하는 것은 쉬운 일이 아니다. 하지만 개발된 최적화 기술을 이용하면 적절한 강종과 부재 성능을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 300개의 초기 모집단을 생성시키고 유전자 알고리즘의 세대 진행에 따라 모든 제약을 만족하며 최소의 목적함수를 갖는 개체를 엘리트 개체로 정의하였다. 그림 2는 유전자 알고리즘에 의한 세대별 엘리트 개체의 비용함수를 나타내는 것으로서, 유전자 알고리즘의 세대 진행에 따라 기둥 열별 가격이 안정적으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

표 5는 설계 사무소의 설계안과 최적화 기법에 의한 설계안의 기둥 열별 강재 및 콘크리트의 재료비용과 응력 비를 나타낸다. A 빌딩의 모든 기둥은 SRC 기둥이므로, SRC 기둥의 콘크리트 크기와 강도 및 철근량은 설계 사무소 안과 동일하게 유지한 채, 유전자 알고리즘을 이용하여 SRC 기둥 내의 H 형강을 표준 데이터베이스에서 선택하여 얻은 결과가 정리 되었다. 최적화 기법을 통해서 얻은 전체 철골 가격

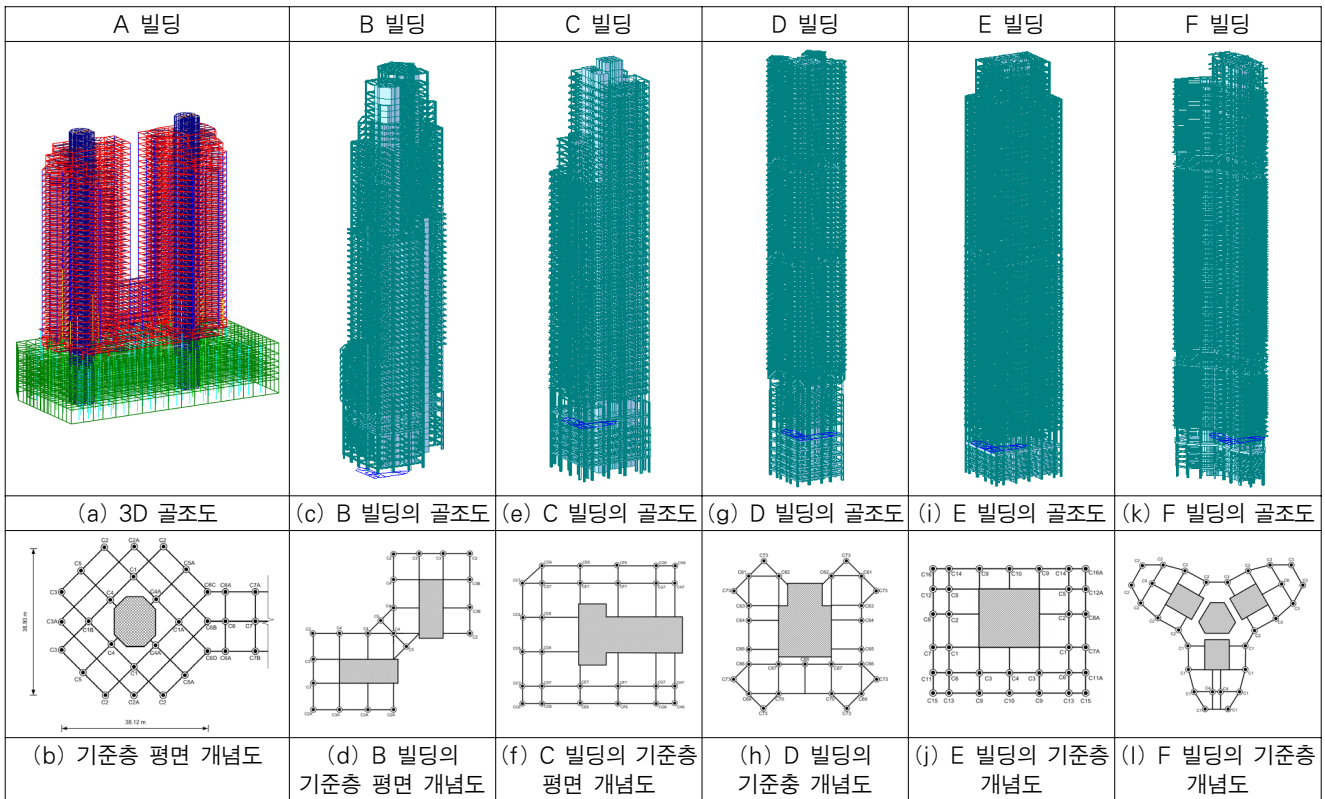


그림 1 예제 구조물

표 4 예제 건물 개요

구분	층수 (지상/지하)	높이 (m)	타워부 평면 크기	구조시스템	하중	기동열 수/ 그룹수
A 빌딩	35/6	119	38.1m×38.9m	- 횡력 저항: RC 전단벽 - 중력 저항: 철골 거더+SRC 기둥	- 풍하중: 풍동실험 결과 - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	57/19
B 빌딩*	55/6	191	30.8m×29.1m	- 횡력 저항: RC 전단벽+아웃리거 트러스+SRC 기둥 - 중력 저항: 철골보+SRC 기둥	- 풍하중: 건축물하중기준 및 해석(2000) - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	35/11
C 빌딩	46/6	163	36.5m×36.5m	- 횡력 저항: RC 전단벽 - 중력 저항: 철골 거더+SRC 기둥 +강재 기둥	- 풍하중: 건축물하중 기준 및 해석(2000) - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	27/14
D 빌딩	69/6	239	40.2m×41.7m	- 횡력 저항: RC 전단벽 +아웃리거 +벨트트러스+SRC 기둥 - 중력 저항: 철골보+SRC 기둥	- 풍하중: 건축물 하중 기준 및 해석(2000) - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	30/10
E 빌딩	66/5	227	42.6m×35.1m	- 횡력 저항: RC 전단벽+아웃리거 +벨트트러스+SRC 기둥 - 중력 저항: 철골보+SRC 기둥	- 풍하중: 건축물 하중 기준 및 해석(2000) - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	33/21
F 빌딩	69/6	255	63.8m×48.4m	- 횡력 저항: RC 전단벽+벨트 월 +SRC 기둥 - 중력 저항: 철골보+SRC 기둥	- 풍하중: 건축물 하중 기준 및 해석(2000) - 지진하중: 건축구조설계기준(KBC2005)	28/6

*C 빌딩의 경우 지하 6층~지상 2층까지는 SRC 기둥이며, 지상 3층 이상은 철골 기둥임

표 5 A 빌딩의 최적화 결과

기둥종류	개수	철골가격(원)		응력 비(%)		콘크리트 가격(원)	
		설계사무소안	최적화후	설계사무소안	최적화후	설계사무소안	최적화후
C1,C1C	4	64,126,786	55,919,386	89.6	96.4	3,234,421	3,327,001
C1A	2	15,735,435	19,119,160	86.0	95.3	1,101,014	1,097,481
C1B,C1D	2	69,371,133	58,862,561	87.3	93.2	3,428,484	3,531,725
C2,C2B	8	36,897,005	29,979,727	91.3	97.5	3,315,093	3,373,821
C2A,C2C	4	13,997,400	11,364,008	93.1	97.2	2,912,195	2,954,642
C3,C3B	4	31,321,303	28,288,146	91.7	94.7	3,664,177	3,724,912
C3A,C3C	2	10,587,736	10,501,206	92.1	96.3	3,271,035	3,259,547
C4,C4B	4	50,757,639	42,869,294	89.9	96.6	3,545,799	3,651,052
C4A	4	52,612,699	42,570,779	92.7	96.4	3,520,229	3,637,851
C5,C5B	4	47,400,829	40,268,056	90.5	94.3	3,670,223	3,372,538
C5A	4	44,516,536	38,223,316	94.7	97.8	3,667,045	3,755,238
C6	2	58,384,368	46,371,327	91.2	97.4	3,588,328	3,698,338
C6A	4	24,907,240	19,109,593	90.8	96.4	3,659,328	3,748,632
C6B	2	53,756,814	43,806,131	86.5	93.1	3,494,893	3,638,950
C6C	2	15,913,511	13,857,763	89.5	97.1	1,119,530	1,133,942
C6D	2	16,487,400	14,552,240	90.8	97.0	1,115,632	1,129,200
C7	1	8,524,838	7,895,292	90.6	94.6	2,051,310	2,073,937
C7A	1	4,466,648	3,609,898	79.2	90.0	1,523,355	1,536,175
C7B	1	4,926,210	4,627,252	90.4	93.0	1,774,498	1,74,867
계	57	2,112,128,257	1,784,561,345	89.9	95.5	53,656,589	54,795,849

은 1,784,561,345원으로 설계 사무소 안에 비해 강제 비용을 약 16%정도 절감 시킬 수 있었다. 지하 1층까지만 존재하는 C1A 기둥 열을 제외하고 모든 기둥 열에서 최적화 기법에 의한 설계안이 더 낮은 가격과 더 높은 평균 응력 비를 가짐으로써 설계 사무소 설계안 보다 더 효율적인 설계가 되었음을 알 수 있다. 최적화 기법을 적용하여 얻어진 콘크리트 가격은 설계 사무소 안에 비해 2%정도 증가하지만, 콘크리트

리트의 재료비용이 전체 재료비용 중에서 차지하는 비중이 작으므로, 콘크리트 재료 가격의 2%증가는 16%의 강제 비용 절감 효과에 비해서는 아주 작은 값이므로 전체 재료비용은 감소하게 된다. 표 8은 최적화 기법으로 얻어진 강종별 강제 가격과 콘크리트의 가격이 정리되어 있다. 표 8에서 A 빌딩의 강종별로 재료비용을 분석하면, SM570TMCP, SM520TMCP 강종이 비용 측면에서 각각 84.8%, 4.8%를

차지하고 있다. SM490Roll 강종은 약 10%정도의 비율을 가진다. 그림 3은 강종의 수직 분포를 나타내는 것으로서 그래프의 음영은 강종을 나타내며, 그래프안의 숫자는 부재 데이터베이스에서 부재의 번호를 나타낸다. 또한, 막대 그래프

의 실선은 부재의 수직 그룹핑을 구분하며, 점선은 층수를 구분한다. 강종 분포 그래프를 보면, 전반적으로 저층부에서 SM570TMCP, SM520TMCP와 같은 고강도강재가 선택되었으며, 상층부에 SM490Roll 강종이 선택되었음을 알 수 있다.

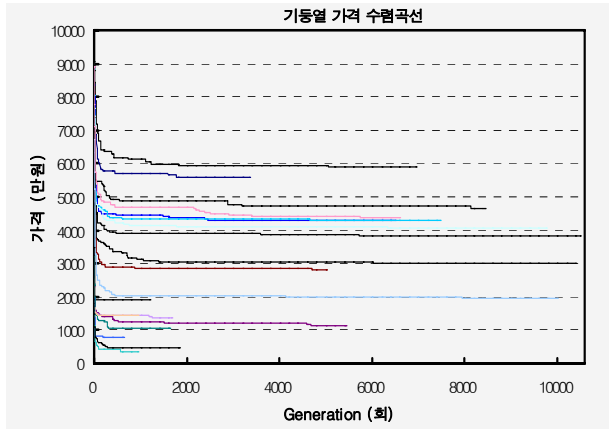


그림 2 A 빌딩의 기동 열별 가격 수렴 곡선

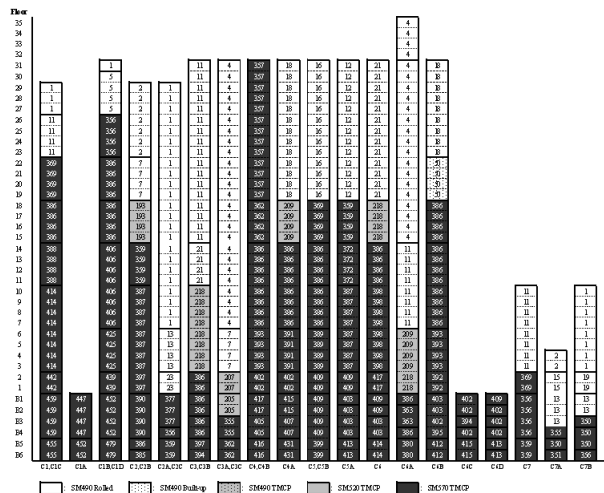


그림 3 A 빌딩의 강종 분포

4.2 B 빌딩 적용결과

표 6은 B 빌딩에 대해서 최적화 기법을 통해서 얻은 최종 결과를 정리한 것으로서 최적화 기법에 의한 전체 철골 가격

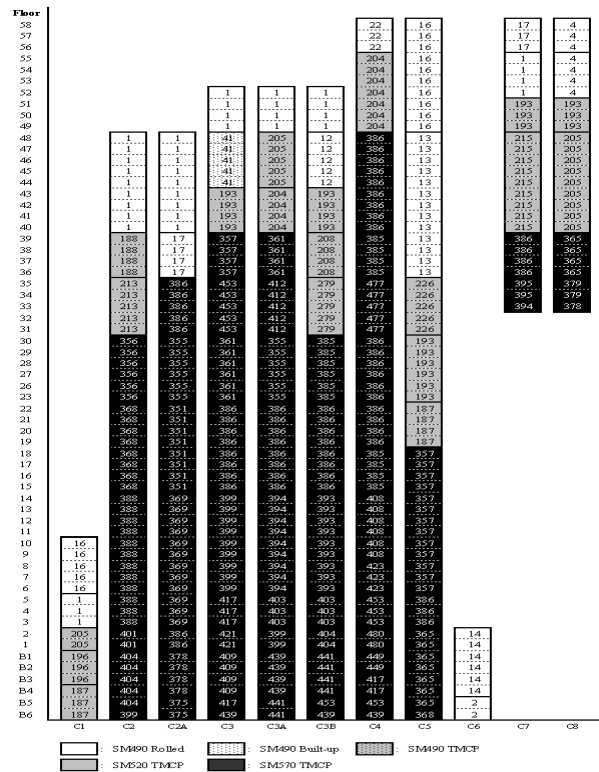


그림 4 B 빌딩의 강종 분포

표 6 B 빌딩의 최적화 결과

기동종류	개수	철골가격(원)		응력 비(%)		콘크리트 가격(원)	
		설계사무소 안	최적화 안	설계사무소 안	최적화 안	설계사무소 안	최적화 안
C1	8	6,908,626	6,485,208	81.6	94.1	2,577,515	2,583,943
C2	4	62,427,121	46,532,586	77.9	93.0	10,289,967	10,432,483
C2A	2	42,739,810	31,448,145	74.7	89.2	10,188,877	10,283,431
C3	4	82,351,407	70,805,616	85.2	92.6	11,139,969	11,240,529
C3A	2	74,449,421	65,422,810	84.5	90.0	11,363,395	11,438,109
C3B	2	81,074,767	72,340,551	84.6	89.6	11,217,651	11,273,616
C4	5	116,553,707	100,017,370	89.0	93.1	11,803,808	11,959,358
C5	2	44,105,705	33,961,284	85.6	95.0	11,220,911	11,281,210
C6	2	4,370,668	2,679,724	81.8	96.9	1,315,133	1,320,966
C7	2	27,327,305	19,790,294	82.2	97.0	2,594,834	2,638,356
C8	2	16,784,272	12,671,928	68.9	87.9	2,654,726	2,702,700
계	35	1,798,855,543	1,497,950,797	81.4	92.6	266,469,960	269,037,163

은 1,497,950,797원으로 설계 사무소 안에 비해 강제 비용을 약 17%정도 절감할 수 있었다. SRC 기둥의 콘크리트 비용은 설계 사무소 안과 비슷하며, 평균 응력 비는 92.6%로서 설계 사무소 안의 81.4% 보다 높게 나타났다.

표 8에서 B 빌딩의 강종별 재료비를 살펴보면, SM570 TMCP, SM520TMCP, SM490Roll이 각각 84.0%, 10.7%, 4.8%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 개발된 최적화 기법을 적용하여 얻은 B 빌딩의 강종별 분포를 나타낸다. 기둥 열의 중·저층부에 SM570TMCP가 선택되었으며, 중·상층부에서는 SM520TMCP, 상층부에서는 SM490Roll 강종이 선택되었다. C6 기둥 열과 같이 저층부에서만 존재하는 기둥은 원 설계안이 SM490Roll 강종으로 설계되었으므로, 최적 설계 후에도 SM490Roll 강종이 선택되었음을 알 수 있다. 또한 C1 기둥 열은 지하 6층에서 지상 10층 까지만 존재함으로써 다른 기둥에 비해서 분담 하중이 크지 않기 때문에 SM570TMCP강종이 선택되지 않은 것으로 분석된다.

4.3 C 빌딩 적용결과

최적화 기법을 통해 최종적으로 얻어진 엘리트 개체에 대한 결과와 구조 사무소의 설계 결과는 표 7과 같다. C 빌딩의 지하 6층에서 지상 2층까지의 SRC 기둥은 앞선 예제와 동일한 방법에 의해서 최적화 기법이 적용되었으며, 3층 이상의 강제 기둥은 표준 데이터베이스에서 H 형강을 선택하여 최적화 알고리즘에 의해서 응력과 인접 층간의 강종만을 제약하였다. 최적화 기법을 통해서 얻은 전체 철골 가격은 841,105,805원으로 설계 사무소 안에 비해 강제 비용을 약 21% 정도 절감 할 수 있었다. 또한 SRC 기둥의 콘크리트

비용은 설계 사무소 안에 비해 2%정도 증가하나 전체 재료 비용에는 큰 영향을 미치지 못한다. 최적화 기법 적용을 통해 얻은 평균 응력 비는 86.3%로서 설계 사무소 안의 77.4%보다 높게 나타났다. CC6, CH6 기둥 열과 같이 평면상에서 모서리에 위치하여 분담하중이 작은 기둥들의 기둥 열별 평균 응력 비는 설계 사무소의 평균응력 비보다 높게

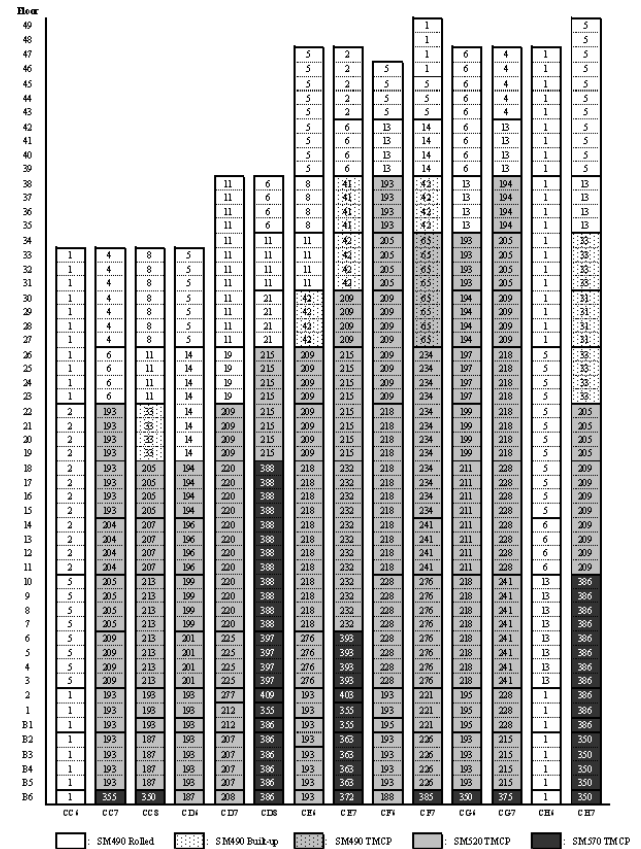


그림 5 C 빌딩의 강종 분포

표 7 C 빌딩의 재료 가격

기둥종류	개수	철골가격(원)		응력 비(%)		콘크리트 가격(원)	
		설계사무소 안	최적화 안	설계사무소 안	최적화 안	설계사무소 안	최적화 안
CC6	1	7,441,039	5,330,622	72.6	69.7	1,337,869	1,343,844
CC7	2	17,521,870	14,878,066	71.9	77.0	1,675,229	1,689,119
CC8	3	27,062,285	18,919,895	76.8	89.7	1,644,831	1,693,035
CD6	2	20,129,896	15,555,472	74.2	85.1	1,668,377	1,690,009
CD7	2	40,631,387	33,705,821	85.1	94.9	1,383,224	1,430,67
CD8	2	58,255,795	44,728,221	82.2	95.1	1,608,877	1,405,884
CE6	2	42,586,365	33,111,067	79.8	86.8	1,608,877	1,688,407
CE7	2	59,451,402	44,354,416	79.5	92.2	1,341,441	1,440,746
CF6	2	50,889,524	35,141,495	77.0	94.2	1,598,427	1,688,239
CF7	2	70,513,567	61,880,548	79.5	88.5	1,557,163	1,619,176
CG6	2	34,523,386	27,559,638	80.8	91.4	1,644,831	1,687,142
CG7	2	60,160,691	47,620,629	78.6	94.5	1,557,163	1,632,913
CH6	2	14,095,951	8,281,111	78.3	72.2	1,318,023	1,343,844
CH7	2	34,828,075	32,150,713	67.7	76.8	1,644,831	1,667,400
계	27	1,068,741,430	841,104,805	77.4	86.3	41,840,456	42,696,606

나타나는데, 이는 설계 사무소에서 표준 부재 데이터베이스의 최소 성능 보다 더 작은 부재를 사용하였기 때문이다. 표 8에서 C 빌딩의 강종별 재료비를 살펴보면, SM570TMCP, SM520TMCP, SM490TMCP, SM490Built-up, SM490 Roll 강종이 각각 16.9%, 67.0%, 2.2%, 3.4%, 10.5%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 개발된 최적화 기법을 적용하여 얻은 C 빌딩의 강종별 분포를 나타낸다. 비교적 층수가 높은 기둥 열에서는 저층부에 SM570TMCP 강종이 선택되었으며, CD6, CE6, CF6, CD7 기둥열과 같이 평면상에서 비교적 분담 하중이 크지 않은 것으로 예상되는 기둥 열에서는 SM570TMCP 강종이 선택되지 않았다. 또한, 평면에서 외곽에 배치된 기둥들은 중력하중 분담 면적이 크지 않으므로 부재 데이터베이스 중에서 23번 이하의 부재가 선택되었으며, 이러한 이유로 인해 SM570TMCP 강재가 차지하는 비중이 다른 예제에 비해서 상대적으로 낮게 나타난다.

4.4 기타 예제 결과 정리

앞선 소개한 3개의 예제 외에 3개의 초고층건물을 대상으로 개발된 최적화 기법을 적용하였으며, 그 결과를 표 8과 같이 정리하였다.

6개의 초고층건물을 대상으로 얻은 결과를 정리하면, 최적 설계에 의한 설계안은 구조 사무소의 경험에 의한 설계안 보다 약 7~21%의 강재 비용 절감 효과를 얻을 수 있었으며, 응력 비도 대체적으로 높게 나타났다. F 빌딩은 설계 사무소에서 표준 데이터베이스 보다 작은 부재를 많이 사용하였기 때문에 최적 결과에서 얻어진 평균 응력 비가 설계 사무소의 응력 비 보다 높게 나타났다. C 빌딩을 제외한 5개의 예제

건물의 기둥은 모두 SRC로 구성되어 있으므로 C 빌딩을 제외한 나머지 예제들의 강종별 재료비용의 비율은 그림 6과 같다. 그림 6에서 개발된 최적화 기법의 적용하여 얻은 강종별 가격 비율은 SM570TMCP, SM520TMCP, SM490TMCP, SM490Built-up, SM490Roll이 각각 82.5%, 9.7%, 0.0%, 0.6%, 8.4%로 구성되어 있다. 6개의 예제 구조물의 강종별 분포를 살펴보면, 주로 저층부에서는 SM570TMCP가 선택되었으며, 중층부에서는 SM520TMCP, 고층부에서는 SM490Roll 강종이 선택되는 경향을 보인다. 이러한 강종의 분포에는 재료 가격이나 응력제약 뿐만 아니라 인접한 두 개 층 사이의 강종에 대한 제약 조건이 함께 반영된 것으로 분석되어 있다. 이러한 결과를 통해 초고층 건물 구조 설계 시에는 저층부에서는 SM570TMCP, 고층부에서는 SM490Roll 강종이 효과적인 것으로 분석되며, 강도에 비해서 재료의 가격이 높은 SM490Built-up 강종과 SM490TMCP 강종은 효과적이지 못한 것으로 분석된다.

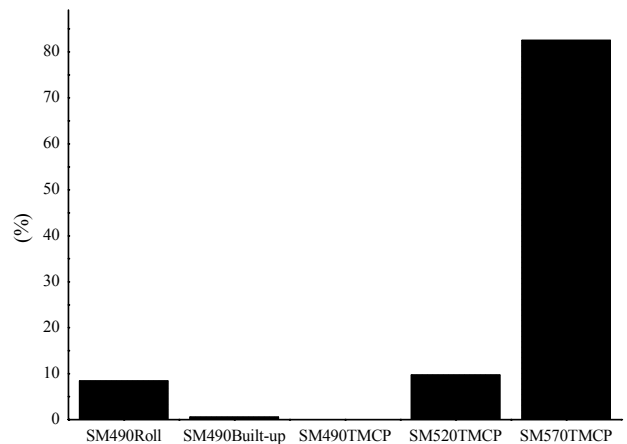


그림 6 강종별 재료비용의 비율

표 8 예제별 결과 정리

(단위 : 천원)

건물명	구조사무소안			최적설계							콘크리트 가격	응력 비 (%)
	강재가격	콘크리트 가격	응력 비 (%)	강재가격					합			
				SM490 Roll	SM490 Built-up	SM490 TMCP	SM520 TMCP	SM570 TMCP				
A빌딩	2,112,128	53,656	89.9	178,193 (10.0%)	6,211 (0.3%)	0 (0.0%)	86,106 (4.8%)	1,514,052 (84.8%)	1,784,561 (100.0%)	54,796	95.5	
B빌딩	1,798,855	266,469	81.4	72,519 (4.8%)	8,065 (0.5%)	0 (0.0%)	159,502 (10.7%)	1,257,864 (84.0%)	1,497,951 (100.0%)	269,037	92.6	
C빌딩	1,068,741	41,840	77.4	88,161 (10.5%)	28,853 (3.4%)	18,489 (2.2%)	563,626 (67.0%)	141,976 (16.9%)	841,105 (100.0%)	42,697	86.3	
D빌딩	1,843,124	133,089	81.9	110,357 (6.4%)	23,658 (1.4%)	0 (0.0%)	140,551 (8.2%)	1,442,216 (84.0%)	1,716,782 (100.0%)	131,368	85.3	
E빌딩	1,873,967	228,145	68.1	84,438 (5.1%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	272,988 (16.6%)	1,288,966 (78.3%)	1,646,391 (100.0%)	228,146	73.9	
F빌딩	1,935,209	559,122	84.1	58,438 (3.5%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	228,807 (13.5%)	1,400,034 (83.0%)	1,687,278 (100.0%)	561,676	82.7	

5. 결 론

최근 초고층건물의 높이가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 재료 강도도 증가하고 있다. 국내에서도 800MPa급의 고강도강재의 생산이 예상되고 있으나 고강도강재의 높은 재료 가격과 적용 사례 부족 및 효율적인 사용법 부재 등의 이유로 초고층건물에서 고강도강재의 사용은 극히 제한적이다. 본 연구에서는 초고층건물 설계 시 고강도강재를 효율적으로 적용할 수 있는 방법으로 유전자 알고리즘을 이용한 초고층건물 구조비용 최적설계법을 개발하였으며, 이를 6개의 실제 초고층건물 설계에 적용하였다. 또한, 최적설계법 개발과 더불어 경험에 의존한 구조 설계를 병행하여 재료비용과 부재 응력을 비교하는 방식으로 개발된 구조비용 최적설계법의 효율성을 평가하였다. 그 결과, 개발된 구조비용 최적설계기법은 구조 설계 사무소의 설계 결과보다 약 7~21%의 강재 비용을 절감시킬 수 있었다. 최적화 기법 적용에 따라 콘크리트의 재료비용은 비슷하거나 다소 증가하나 전체 재료비용에는 크게 영향은 미치지 못한다.

최적화 기법에서 얻어진 강종별 재료비용을 분석해 보면, 전체 재료비용 중 SM570TMCP, SM520TMCP 강종이 90% 이상을 차지하며 SM490TMCP와 SM490Built-up 강종은 거의 선택되지 않았다. 이러한 결과는 초고층건물 설계 시 SM570TMCP, SM520TMCP과 같은 고강도강재를 사용하는 것이 비용 측면에서 효과적이라는 것을 알 수 있다. 또, 최적화 기법으로 얻어진 강종 분포를 통해 저층부 SM570TMCP, 중층부에서는 SM520TMCP, 고층부에서는 SM490Roll강종을 사용하는 유리한 것으로 분석되어 진다.

이상의 결과를 통해 개발된 구조비용 최적설계법은 고강도강재를 초고층건물에 적용시킬 수 있는 효율적인 방법임을 알았다. 또한, 최적설계법 적용 결과인 강재 량과 강재의 수직 분포에 대한 분석 결과는 초고층건물에 고강도강재 적용을 위한 가이드라인의 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

대한건축학회 (2006) 건축구조설계기준 및 해석. 대한건축학회, 서울, 대한민국, p.710.

서지현, 권봉근, 김상범, 박효선 (2009) 고강도강재를 사용한 건물골조방식 초고층건물의 구조비용 최적화, 한국전산구조공학회 논문집, 22(1). pp.53~64.

임성우, 장인화 (2003) 고강력(SM570) 강재의 기동재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 15(1).

장인화 (2002) 고강도강의 건축 구조 적용, 초고층 구조시스템의 새로운 방향, 대한건축학회 세미나.

한국강구조학회 (2005) KBC 2005 강구조 설계, 구미서관, 서울, 대한민국, p.463.

Baker W.F. (1990) Sizing Techniques for Lateral Systems in Multi-story Steel Buildings, *Proceedings of 4th World Congress on Tall Building: 2000 and Beyond*, pp.545~553. CTBUH, Hong Kong.

Chan C.M. (2001) Optimal Lateral Stiffness Design of Tall Buildings of Mixed Steel and Concrete Construction, *The Structural Design of Tall Buildings*, 10. pp.155~177.

Charney F.A. (1991) The Use of Displacement Participation Factors in the Optimization of Drift Controlled Buildings, *Proceedings of the 2nd Conference on Tall Buildings in Seismic Regions, 55th Regional Conference*, pp.91~98. Los Angeles, CA.

Cohn M.Z., Dinovitzer A.A. (1994) Application of Structural Optimization, *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 120(2). pp.617~650.

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.

Holland, J.H. (1975) Adaptation in natural and artificial system, Univ. Michigan Ann Arbor, MIT

Leith J.P.B., Topping B.H.V. (1999) Parallel simulated annealing for structural optimization, *Computer and Structure*, 73. pp.545~564.

Park H.S., Sung C.W. (2002) Optimization of Steel Structures Using Distributed Simulated Annealing Algorithm on A Cluster of Personal Computer, *Computer and Structures*, 80. pp.1305~1316.

Park H.S., Hong K.P., Seo J.H. (2002) Drift Design of Steel-frame Shear-wall Systems for Tall Buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 11. pp.35~49.

Park, H.S., Kwon, Y.H., Seo, J.H., Woo, B.H. (2006) Distributed Hybrid Genetic Algorithm for Structural Optimization on PC Cluster, *Journal of Structural Engineering*. 132(12).

Structural Stability Research Council (1979) A Specification for the Design of Steel-Concrete Composite Columns, *Engineering Journal 4th Quarter 1979*, pp.101~115.

Takao Nishikawa (2005) Recent Trend of Structural Design of High-Rise Buildings in Japan, 대한건축학회 학술발표대회(창립 60주년 기념), 25(1).