

고강도강재를 사용한 건물골조방식 초고층건물의 구조비용 최적화

Structural Cost Optimization Techniques for High-rise Buildings Frame Systems Using High-strength Steels

서지현† 권봉근** 김상범*** 박효선*
Seo, Ji-Hyun Kwon, Bong-Keun Kim, Sang-Bum Park, Hyo-Seon
(논문접수일 : 2008년 9월 30일 ; 심사종료일 : 2008년 11월 30일)

요 지

초고층건물의 구조설계에 고강도강재를 활용하는 것은 수직 부재 크기의 감소로 인한 건축 계획적 측면의 용이성 그리고 골조 물량의 감소로 인한 구조 및 시공 측면에서의 비용적 효율성 등이 예상되지만 적용사례 부족 및 합리적 설계 방법의 부재 등의 이유로 인해 고강도강재는 일부 건축물에서 제한적으로 사용되고 있다. 특히, 많은 부재로 구성되는 초고층 건물에서 강재의 적절한 강도를 고려한 경제적 단면 성능의 결정은 결코 쉬운 일이 아니다. 이러한 이유로 인해 최근 많은 초고층건물들은 콘크리트를 이용하여 계획되거나 시공되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 초고층건물 구조설계에서 강재의 적절한 강도와 사용위치를 합리적으로 결정하여 구조비용을 최소화할 수 있는 초고층건물 구조비용 최적화기법을 개발하였다. 개발된 최적설계기법을 건물골조시스템의 35층 건물의 구조 설계에 적용하여 효율성과 적용성을 평가하였다. 적용 결과, 제안된 최적설계기법은 설정된 제약조건을 만족시키며 최적의 구조비용을 안정적으로 산출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 초고층건물, 구조비용최적화, 고강도강재, 유전알고리즘

Abstract

Use of high-strength steel members in building of high-rise buildings and large scale structures is expected to increase the effectiveness of structural design by reducing the weight and cost of structures. So far, high-strength steel members have been used in a very limited way because it is hard to select the proper strengths of steel members in a systematic way with the consideration of the structural cost. In this paper, therefore, a structural optimization technique based on Genetic algorithm is developed for effective use of high-strength steel members in structural design of high-rise buildings with the form of building frame system. The stability and efficiency of the technique is evaluated by using to a 35-story building. As a result, a stable and reliable optimal solution was obtained with a difference of 2.63% between individual and mean optimal structural costs.

Keywords : high-rise buildings, Structural cost optimization, High-strength steel, Genetic algorithm

1. 서 론

최근 아시아와 중동 지역을 중심으로 초고층건물의 건설이 증가하고 있다. 건물의 층수와 높이가 증가함에 따라 구조 부재가 부담해야할 하중이 증가하게 되고, 이에 따라 구조 부재의 대형

화와 구조재료의 고강도화가 진행되고 있다. 연도별로 시공된 초고층건물의 구조재료를 분석해 보면, 1960년대에서 1980년대까지는 주로 철골 건물의 비율이 높으나, 1990년대 이후에는 콘크리트 건물의 비율이 더 높아지고 있다. 이는 1980년대 이후 콘크리트 강도가 비약적으로 증가한 것에 기인한 것이 하나

† 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 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

의 요인으로 분석될 수 있다. 1980년대에 20MPa 정도였던 콘크리트의 압축 강도는 2000년대에는 100MPa까지 약 5배 증가한 반면, 강재는 400MPa에서 600MPa로 약 1.5배 정도 증가하였다. 최근에 800MPa급의 고강도강재가 생산되고 있는 것을 감안 하더라도 강재의 강도 증가 속도는 콘크리트의 강도 증가 속도를 따라가지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 강재는 시공 측면의 편이성, 건축 계획적 차원의 유연성, 재료적 측면의 친환경성 등과 같은 많은 장점들을 여전히 가지고 있다. 특히 초고층건물의 수직부재에 작용하는 수직하중의 크기를 고려하면 초고층건물에서의 고강도강재의 사용은 시공 및 비용 측면에서 효과적일 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 고강도강재의 사용은 일부 초고층건물에서만 제한적으로 사용되고 있다(임성우 등, 2004; 장인화, 2003).

최근 고강도강재의 사용을 활성화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 대부분의 연구가 고강도강재의 비선형 특성이나 용접성 등과 같은 재료적 특성에 대한 실험과 해석이 주를 이루고 있으며 고강도강재의 사용에 따른 경제성 및 설계 방법에 대한 연구는 많지 않다.

일본에서 20층 오피스 건물을 대상으로 강재를 490MPa 급에서 590MPa급으로 대체할 경우 약 12%의 강재량을 절감할 수 있는 것으로 보고하고 있다(Takao, 2005). 하지만 이 연구 결과에는 강종에 따른 강재 가격이 고려되어 있지 못하고 20층 건물을 대상으로 얻어진 결과가 초고층건물에도 그대로 적용될 수 있을 지 의문이다. 국내에서는 철골 골조가 횡하중을 부담하지 않는 38층 건물과 철골 골조가 횡하중을 부담하는 34층 건물을 대상으로 각각 SM 490에서 SM 570 강재로 대체 할 경우의 경제성을 평가한 결과를 발표하였다. 여기서, 철골 가공비, 운반비, 시공비 등을 고려할 때 고강도강재 사용에 따라 횡하중은 부담하지 않는 건물과 횡하중을 부담하는 건물의 철골 공사비는 각각 5.6%, 5.0% 절감되며, 총 강재 량은 각각 13.2%, 7.2% 감소한 것으로 보고되고 있다. 하지만 강종별 강재의 가격을 고려하면 철골 재료비용은 비슷하거나 오히려 증가하는 것으로 보고되었다(임성우 등, 1999). 이러한 연구 결과에서 초고층건물 설계에 고강도강재가 효율적일 것이라고 보고되고 있긴 하지만, 이러한 결과는 설계자의 경험과 직관에 의존하여 부재를 선택하고 있으며, 아직 고강도강의 사용을 위한 정형화되거나 체계화된 설계법은 개발되어 있지 못하다. 특히 많은 부재로 이루어진 초고층건물 구조설계에서 적절한 강재의 강도나 부재 성능을 결정하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다.

초고층건물 설계에서 고강도강재의 정형화된 설계법의 부재와 적용사례 부족은 실무 설계자로 하여금 고강도 강의 사용을 주저하게 하는 주요한 원인이 되고 있다. 초고층건물

설계에 고강도 강의 사용을 활성화하기 위해서는 고강도강재를 이용한 효율적이고 정형화된 설계법의 개발이 절실히 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 강재의 강도별 재료가격을 고려하여 구조비용을 최소화할 수 있는 최적 설계 기법을 개발하였다. 제안된 최적화 설계 기법은 유전자 알고리즘을 이용하여 강도에 따른 강재와 콘크리트 재료가격을 고려하여 구조비용을 최소화시키므로 최적의 비용을 얻기 위한 강재와 콘크리트의 부재 크기와 강도를 결정할 수 있게 된다. 본 연구에서는 건물골조방식의 수직 부재인 기둥만을 대상으로 최적화 기법을 적용하였다. 건물골조방식은 횡력의 75%이상을 코어 전단벽이 부담하는 경우이며 이때, 코어가 모든 횡력을 부담하고 모멘트 골조는 중력하중만을 부담하는 것으로 가정하게 된다. 건물골조방식에서 기둥은 중력하중만을 부담하므로, 최적화 과정에서 기둥 단면 성능 변경에 따른 기둥의 하중은 자중의 변화정도이며, 이는 기둥이 부담하는 전체 중력하중에 비하여 상대적으로 작은 값이므로 기둥의 하중과 부재력은 일정한 것으로 가정할 수 있다. 이러한 이유로 개발된 최적화 기법은 반복적인 구조 해석은 요구하지 않으므로 부재수가 많은 초고층건물에도 적용이 가능한 실용적인 방법이다.

일반적으로 초고층건물은 최상층 변위를 제어하기 위해 코어 전단벽의 강성이 매우 강해서 코어가 횡력의 75%이상을 부담하는 건물골조방식의 구조시스템이 되는 경우가 많으며, 개발된 최적화 기법은 많은 초고층건물의 설계에 적용될 수 있다. 또한, 건물골조방식이 아니더라도 부정정 치수가 초고층건물에서 기둥 강성의 변화는 전체 횡 강성에 크게 영향을 미치지 않으며, 기둥 자체의 부재력은 일정한 것으로 가정할 수 있다(Baker, 1990; Charney, 1991; Park, 2002). 이러한 사실은 개발된 최적화 기법이 건물골조방식 뿐만 아니라 다른 구조시스템의 초고층건물의 설계에도 적용될 수 있는 가능성을 보여 준다. 개발된 초고층건물 구조비용 최적화 기법을 35층 건물골조방식 건물의 구조 설계에 적용하여 효율성 및 안정성을 평가하였다.

2. 구조비용 최적화 알고리즘

2.1 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전자 알고리즘(GA)은 목적함수나 제약함수의 연속성과 미분가능성에 무관하게 유전연산자(genetic operator)에 의하여 최적 해를 찾는 휴리스틱 기법 중의 하나로서 강력한 탐색 능력으로 인해 설계 변수와 제약이 많은 대형 수리문제에 적합한 것으로 알려져 있다(Holland, 1975). 이 논문에서

서 기둥 열별 최적화 기법을 적용할 경우, 60층 전후의 초고층건물 내의 기둥 부재를 철골구조에서 일반적으로 사용되는 3개 층으로 부재 그룹핑하면 각 기둥 열에 설계변수는 총 20개가 된다. 20개의 각 설계 변수는 각종 강도와 단면성능을 가진 기둥 단면으로 구성된 부재 데이터베이스에서 적절한 단면을 선택하게 된다. 만약 각 설계 변수가 선택할 수 있는 기둥 단면의 종류가 총 3584개인 경우에는 20개의 설계변수로 구성된 1개의 기둥에 대한 설계 대안은 20^{3584} 라는 경우의 수 또는 탐색 영역을 가지게 된다. 물론 선택된 설계 대안은 응력과 시공성에 대한 제약 조건을 만족해야 한다. 그리고 3584개의 철골 부재의 경우 부재 단면 성능이 연속되지 않으므로 이산형 설계변수를 이용하여 구조최적화가 정식화되어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 해의 탐색 영역, 설계변수의 특징 등을 고려할 때 미분이 필요치 않는 휴리스틱 기법이 적당할 것으로 판단되며, 이러한 휴리스틱 기법 중에서 개념이 단순하고 유연성이 높은 것으로 알려진 단순 유전 알고리즘(Simple Genetic Algorithms, SGA)을 최적화 알고리즘

으로 사용하였다. 단순 유전자 알고리즘은 개체 사이의 교배와 돌연변이 발생을 통해 좋은 형질을 가진 개체의 유전 인자가 다음 세대에 유전될 확률을 높임으로서 세대가 지나감에 따라 좋은 형질의 개체를 얻게 하는 방식으로 최적 해를 찾게 된다.

본 연구에서 제안하는 유전자 알고리즘을 이용한 초고층건물 비용 최적화 기법의 순서는 그림 1과 같다. 첫째, 구조해석을 통해 구조 설계에 필요한 부재력을 확보한다. 둘째, 건물 모델링 데이터 획득, 부재 단면 데이터베이스 작성, 유전자 알고리즘에 필요한 파라미터 결정의 과정을 거친다. 셋째, 유전자 알고리즘을 통해 최적 해를 찾는 과정으로 모집단 생성, 적합도 평가, 교배, 돌연변이 발생 등의 일련의 반복 과정을 통해 최적 해를 찾게 된다.

2.2 정식화(Formulation of GAs)

2.2.1 목적함수

본 논문에서 목적함수는 매입형 합성(SRC) 기둥의 강재와 콘크리트의 강도별 재료 단가를 고려한 구조비용을 최소화하는 것으로 식 (1)과 같다.

$$\text{Minimize } f(X) = \sum_{i=1}^M \{A_{sti}^i L^i \rho_{sti} C_{sti} + A_{con}^i L^i C_{con}\} \quad (1)$$

여기서, $f(X)$ 는 기둥열의 구조비용을 나타내는 목적함수이며, A, L, ρ, C 는 각각 부재 단면적과 부재 길이 및 재료 밀도, 재료가격을 나타낸다. 하첨자 sti, con 은 각각 강재와 콘크리트를 나타내며, 상첨자 i 는 i 번째 부재를 나타낸다. M 은 한 기둥 열에서 총 부재의 개수를 나타낸다. 매입형 합성(SRC) 부재에서 콘크리트의 단면적은 전체 부재 단면적에서 강재와 철근의 단면적을 뺀 값이다. 최적화 과정에서 철근은 초기 설계에서 결정된 철근 면적을 그대로 사용하므로 목적함수에서 철근의 비용을 포함되지 않았다.

2.2.2 제약함수

제약함수는 매입형 합성(SRC) 기둥 부재의 응력과 시공성에 대한 제약으로 식 (2)~식 (5)와 같다. 응력에 대한 제약은 한국강구조학회 강구조설계 기준(2003)을 따라 응력비가 1.0을 초과하지 않도록 식 (2)와 같이 제약하였다. 시공성에 대한 제약은, 인접한 두 개 층에서 위 층 부재의 전 단면적, 강재의 내측 치수, 강재의 항복 강도, 콘크리트의 압축 강도가 아래 층 보다 크지 않도록 제약하였다. 인접 층에서 전 단면적과 강재 내측 치수에 대한 제약은 원활한 부재 조

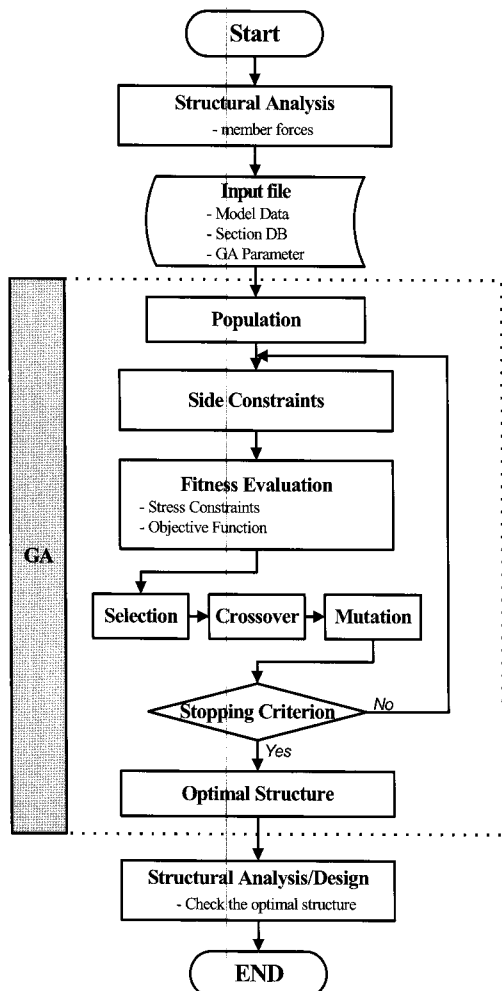


그림 1 유전알고리즘을 이용한 최적화 기법의 흐름도

립을 위한 고려이며, 인접 층간의 강재와 콘크리트 강도에 대한 제약은 높이에 따라 재료 강도가 뒤섞임으로 발생할 수 있는 시공성의 저하를 피하기 위함이다.

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

$$\frac{A_g^{i+1}}{A_g^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

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

$$\frac{F_y^{i+1}}{F_y^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

$$\frac{f_{ck}^{i+1}}{f_{ck}^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (6)$$

여기서, $\sigma_{allow}, \sigma_{actual}$ 은 각각 부재의 허용 응력과 실제 응력을 나타내며, A_g, S_{stl} 은 매입형 합성(SRC) 기둥 부재의 전단면적과 강재 내측 치수를 나타낸다. 또, F_y, f_{ck} 는 각각 강재의 항복 강도와 콘크리트의 압축강도를 나타내며, 상첨자 $i, i+1$ 은 인접한 두 개 층을 나타낸다.

2.2.3 적합도 함수의 설정

유전자 알고리즘을 이용하여 최적화 문제를 풀기 위해 위와 같은 제약 최소화 문제에 벌칙함수를 도입하여 식 (7)과 같은 적합도 함수를 구성하였다. 제약함수와 목적함수 사이 뿐 만 아니라, 제약함수들 간의 항목과 크기가 다를 경우 특정 제약 함수나 목적함수가 적합도 함수 지나치게 지배적인 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 식 (8)~식 (14)와 같이 목적함수와 제약함수를 정규화하여 적합도 함수를 구성하였다.

$$\text{Maximize } \tilde{F}(X) = 2 - \{(1-\gamma)\tilde{f}(X) + \gamma\tilde{p}(X)\} \quad (7)$$

$$\tilde{f}(X) = \frac{f(X)}{\{f(X)\}_{\max}} \quad (8)$$

$$\tilde{p}(X) = \max\left(0.0, \frac{\tilde{g}(\sigma) + \tilde{g}(N_\sigma)}{2}\right) \quad (9)$$

$$\tilde{g}(\sigma) = \frac{g(\sigma)}{g_{\max}(\sigma)} \quad (10)$$

$$g(\sigma) = \sum_{i=1}^M \max\left(\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} - 1.0, 0.0\right) \quad (11)$$

$$g_{\max}(\sigma) = \max\{g_j(\sigma) \quad j = 1, \dots, np\} \quad (12)$$

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

$$N_\sigma^i = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} \leq 1.0 \\ \frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} & \\ 1 & \text{if } \frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} > 1.0 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

여기서, $\tilde{F}(X), \tilde{f}(X), \tilde{p}(X), r$ 는 각각 적합도 함수, 정규화된 목적함수, 정규화된 벌칙함수 및 벌칙 상수를 나타낸다. $f(X), \{f(X)\}_{\max}$ 는 목적 함수와 목적 함수가 가질 수 있는 최대값을 나타낸다. $\tilde{g}(\sigma), \tilde{g}(N_\sigma)$ 는 정규화된 응력제약 조건 위배를 함수와 정규화된 응력 제약 조건 위배 횟수 함수를 나타낸다. 또한, $g(\sigma), g_{\max}(\sigma)$ 는 각각 응력 제약 조건 위배 횟수 함수와 개체 중에서 최대 응력 제약 조건 위배 횟수 함수를 나타내며, np 는 모집단의 수를 나타낸다. N_σ, M 는 응력 위배 여부와 해당 기둥열의 부재 수를 나타낸다.

본 연구에서는 식 (2)와 같은 응력 제약 함수가 적합도 함수에 보다 합리적으로 반영될 수 있도록 응력 제약 함수를 제약조건 위배율과 제약조건 위배 횟수로 나누어 벌칙함수에 반영시켰다. 제약 조건은 총 5개이나 제약조건의 수가 많아 지면 수렴에 필요한 반복회수가 증가하게 되므로 본 연구에서는 응력 제약 조건 만을 적합도 함수에 반영하고, 나머지 식 (3)~식 (6)에 해당하는 시공성 제약 조건은 부 제약 조건(side constraints)으로 사용하였다. 식 (5)의 강재의 항복강도 제약 조건이 위배될 경우 위층 부재의 강재 항복 강도를 아래층 부재의 강재 항복 강도와 동일하도록 위 층 강재의 항복 강도를 수정하였다. 식 (3)과 식 (4)의 부재 전단면적과 강재 내측 치수 제약 조건이 위배될 경우, 강재의 강도를 유지한 채, 데이터베이스에서 현재 선택된 부재 보다 작은 부재를 차례로 선택하여 제약 조건을 만족시키도록 하였다. 또한, 식 (6)의 콘크리트의 압축강도 제약 조건이 위배될 때는 위층 부재의 압축 강도가 아래층 부재의 콘크리트 압축 강도와 동일하도록 콘크리트 강도를 수정하였다. 제안된 최적화 기법에서는 이러한 시공성에 대한 제약 조건을 만족시킨 후에 적합도 평가를 실시하였다.

2.2.4 스케일링

식 (7)과 같은 적합도 함수는 0.0~2.0 사이의 값을 가지는데, 적합도 함수의 범위가 크기 않을 경우 수치적 오차가 발생할 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 식 (15)와 같은 선형 스케일링 방법을 이용하여 적합도 함수를 보정하였다. 식 (15)에서 $C_{\max} = 10$ 으로 하였을 때 스케일링된 적합도

함수의 범위는 0.0~10.0이다.

$$F(X) = \frac{C_{\max}}{\{\tilde{F}(X)\}_{\max} - \{\tilde{F}(X)\}_{\min}} (\tilde{F}(X) - \{\tilde{F}(X)\}_{\min}) \quad (15)$$

여기서, $F(X)$, C_{\max} 는 스케일링된 적합도 함수와 스케일링 이후의 최대 적합도 값을 나타내며, $\{\tilde{F}(X)\}_{\max}$, $\{\tilde{F}(X)\}_{\min}$ 은 각각 한 개체가 가질 수 있는 최대 적합도 함수와 최소 적합도 함수를 나타낸다.

2.3 파라미터 결정

2.3.1 교차율, 돌연변이율

본 연구에서 사용한 단순 유전 알고리즘의 파라미터는 De Jong이 제시한 기본 변수(standard parameter setting)을 기초로 하여 설정하였다(De Jong, 1975). 다양한 영역의 탐색을 위하여 교차율은 0.4에서 0.8사이의 값을 사용해야 한다는 De Jong의 연구결과에 의해 본 연구에서는 0.6을 교차율(cross-over ratio)로 사용하였다. 그리고 돌연변이율이 0.05이상일 경우 그 세대의 최고 적응도를 갖는 개체가 다음 세대에 생존하기 어렵다는 연구를 토대로, 본 연구에서는 돌연변이율은 0.03으로 설정하였다.

2.3.2 벌칙상수(γ)

본 연구에서 적합도 함수는 정규화 된 목적함수($\tilde{f}(X)$)와 정규화 된 벌칙함수 및 벌칙상수(γ)의 조합으로 식 (7)과 같이 표현되었다. 식 (7)의 적합도 함수는 벌칙상수가 zero에 가까워질수록 목적함수의 영향이 커지고, 벌칙상수가 1에 가까울수록 제약함수의 영향이 커지게 된다. 벌칙 상수에 따라서 해의 수렴 속도와 탐색 범위가 달라질 수 있으므로, 적절한 벌칙함수의 결정이 필요하다. 본 연구에서는 50개의 개체로 구성된 초기 모집단을 대상으로 정규화된 목적함수와 정규화 된 위배율과 위배 횟수 함수를 그림 2와 같이 나타내었다. 1번 개체와 2번 개체는 부재 데이터베이스 중에서 단면 성능이 가장 큰 부재와 가장 작은 부재로 구성된 개체를 인위적으로 생성한 것이며, 나머지 개체는 랜덤 생성 기법을 이용하였다. 엘리트 개체는 제약 조건을 모두 만족하면서 목적함수의 값이 작은 개체로 정의할 때, 1, 2번 개체를 제외한 나머지 개체 중에서 정규화 된 응력 위배율과 응력 위반 횟수가 낮은 26, 34, 50번 개체가 엘리트 개체의 후보로 판단되어 진다. 현재 초기 모집단으로 산출된 50개의 개체 중에서 응력 조건을 모두 만족하는 개체는 1번과 50번 개체이며, 50번 개체의 목적함수가 1번 개체 보다 낮으므로 50번

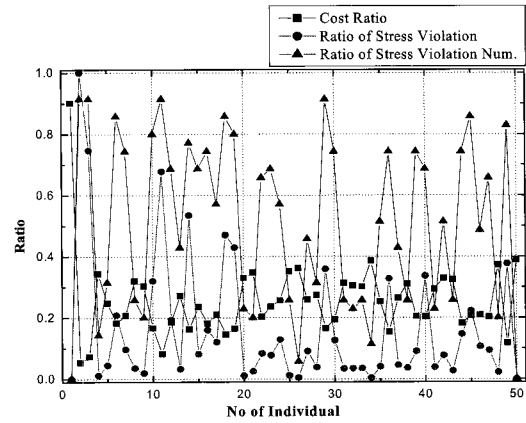


그림 2 개체별 정규화된 목적함수 및 응력제약조건 위반율

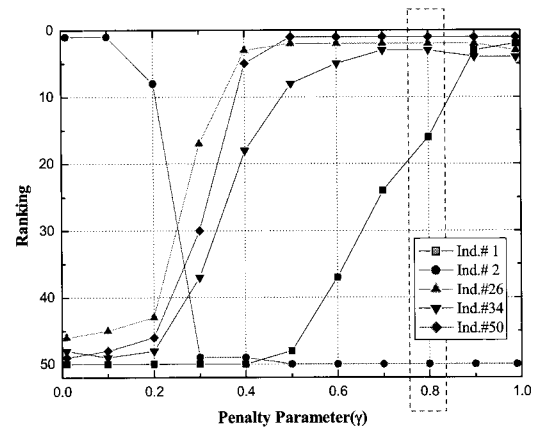


그림 3 벌칙상수에 따른 적합도 순위

개체가 현 세대의 엘리트 개체가 된다. 1번 개체는 엘리트 개체가 되기 위한 응력 제한 조건은 모두 만족하고 있지만, 목적함수의 값이 매우 크다, 그에 반해, 26, 34번 개체는 제약 조건은 다소 위배하지만 목적함수 값이 비교적 작으므로 약간의 수정으로 엘리트 개체가 될 확률이 높다. 그러므로 1번 개체 보다는 26, 34번 개체가 엘리트가 될 확률이 높도록 벌칙 상수를 정하고자 하였다. 적절한 벌칙 상수를 결정하기 위해서 벌칙 상수에 따른 각 개체들의 적합도 순위를 결정하고, 1, 2, 26, 34, 50번 개체의 적합도의 순위(rank)를 그림 3과 같이 표현하였다. 그림 3에서, 초기 모집단의 엘리트 개체인 50번 개체의 적합도가 제일 크고, 26번, 34번 개체의 적합도가 1번 개체의 적합도가 크게되는 벌칙상수의 범위는 0.5~0.9이다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서는 0.8을 벌칙 상수로 사용하였다.

2.3.3 종료 조건과 모집단의 크기

안정적이고 신뢰성 있는 최적값과 최적화과정에서 요구되

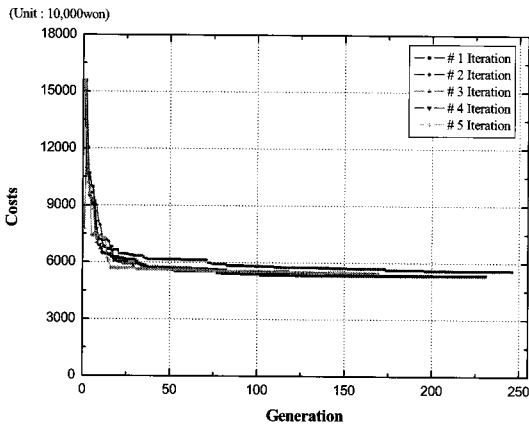


그림 4 가격 수렴곡선(모집단의 크기 20, 가용해 비율 15%, 엘리트개체반복횟수 50회)

는 계산량을 최소화하기 위해서는 적절한 종료 조건이 필요하다. 본 연구에서는 최대 세대수, 엘리트 개체의 적합도 변화율, 제약 조건을 만족하는 가용해의 비율을 종료 조건으로 사용하였다. 또한, 모 집단의 크기는 해석 시간과 직접 관련이 있으므로 문제에 맞는 적절한 모집단의 크기를 설정하여야 한다. 본 연구에서는 적절한 모집단의 설정과 종료 조건을 검증하기 위해서 하나의 기둥열에 대해서 모집단의 크기와 종료 조건을 조절하여 얻은 결과를 표 1과 같이 정리하였다. 표 1에서 모집단의 크기와 수렴 세대수 및 최적 가격을 분석하여 모집단의 개체 수는 20개, 최대 반복 횟수는 1000회, 엘리트 개체의 반복회수는 50회, 가용해 비율은 15%로 설정하였다. 설정된 파라미터 들을 이용하여 한 기둥을 대상으로 5회 반복 최적화를 수행한 결과 그림 4와 같이 안정적인 수렴 곡선을 얻을 수 있었다. 여기서 평균응력비는 93.8%, 평균 수렴 세대수는 216회, 평균 최적 가격과 최대 가격과의 오차는 2.5% 정도로 나타났다.

3. 예 제

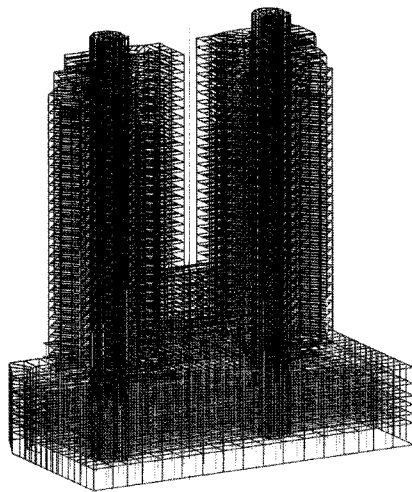
3.1 건물 개요

예제로 사용된 건물은 지상 35층, 지하 6층의 주상 복합 건물로서 높이는 119m, 타워부 폭은 38.12m×38.93m로서 형상은 그림 5와 같다. 이 건물은 건물 골조 방식으로서 전단벽과 골조는 핀으로 모델링되어서 횡력은 전단벽이 부담하고, 매입형 합성(SRC) 기둥과 강재보로 구성된 모멘트 골조는 중력하중만을 부담한다. 풍하중은 풍동실험 결과를 이용하였으며 지진하중은 대한건축학회 건축구조설계 기준을 따라 산정하였다. 본 예제는 57개의 기둥 열로 구성되어 있으며, 평면상의 위치 및 분담 하중을 고려하여 19개 종류의 기둥 열로 나뉘어 졌으며, 각 기둥 열 별로 개발된 최적화 기법을 적용하였다.

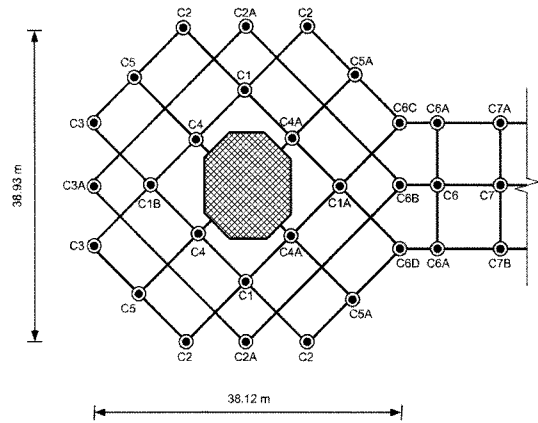
일반적으로 구조 설계 및 시공의 효율성을 고려하여 몇 개 층 단위로 같은 단면 성능과 재료 강도를 가진 부재를 사용하게 되는데, 이 예제에서는 2~3개 층 단위로 부재를 그룹핑하였다. 한 기둥 열에서 기둥 부재의 그룹핑 수는 설계 변수가 되며, 이 예제는 최고 15개의 부재 그룹을 가진다. 각 기둥 그룹은 재료 강도와 단면 성능을 고려하여 만들어진 매입형 합성 기둥 데이터베이스에서 부재를 선택하게 된다. 매입형 합성 기둥 부재 데이터베이스에서 강재는 SM490Roll(압연 형강) 부재 23개, SM490Built-up(조립형강) 부재 31개, SM 490TMCP 부재 132개, SM520TMCP 부재 163개, SM570TMCP 부재 163개 등 총 512개의 부재로 구성되었으며, 표 2와 같이 정리된다. 본 연구에서는 강재 512개 종류와 7 종류의 콘크리트가 포함되어 총 3584개의 매입형 합성 부재 데이터베이스를 구축하였다. 매입형 합성 부재 데이터베이스에서 콘크리트의 피복두께는

표 1 모집단의 크기, 종료조건별 최적알고리즘 수행결과

구분	모집단의 크기	20	40	60	100	200	엘리트개체의 적합도 반복회수	가용해 비율 (%)
		최적가격(천원)	47,793	48,525	48,616	50,849			48,825
CASE I	최적가격(천원)	47,793	48,525	48,616	50,849	48,825	50	20
	응력비(%)	96.5	94.6	95.6	93.4	95.0		
	수렴세대수	408	297	275	224	226		
CASE II	최적가격(천원)	49,679	51,661	50,369	48,773	48,901	50	10
	응력비	93.3	92.9	94.2	93.3	95.4		
	수렴세대수	230	205	330	143	299		
CASE III	최적가격	49,913	50,994	53,454	50,738	51,440	50	5
	응력비(%)	92.9	95.3	89.9	92.0	91.0		
	수렴세대수	264	145	145	166	177		
CASE IV	최적가격(천원)	49,150	52,882	50,668	50,298	51,930	30	20
	응력비(%)	94.5	92.2	89.9	91.8	94.0		
	수렴세대수	183	118	102	186	98		



(a) 3D 골조도



(b) 기준층 평면 개념도

그림 5 예제 구조물

표 2 부재 단면 데이터 베이스

Steel Type	No.	Steel Series	Member Size							Material Properties				Cost
			Hc (mm)	Bc (mm)	H (mm)	B (mm)	tw (mm)	tf (mm)	Ar (mm)	Fy (MPa)	Fyr (MPa)	Fu (Mpa)	Es (MPa)	
SM490 압연 (23개)	1	200	450.0	450.0	200.0	200.0	8.0	12.0	50.088	325	372	490	206000	35466

SM490 (31개)	23	400	700.0	700.0	428.0	407.0	20.0	35.0	76.088	325	372	490	206000	205612
	24	300	600.0	600.0	300.0	300.0	10.0	15.0	77.088	325	372	490	206000	82469

	40	350	650.0	650.0	350.0	350.0	30.0	30.0	77.088	325	372	490	206000	211374
SM490 TMCP (132개)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	54	400	800.0	800.0	440.0	400.0	35.0	35.0	77.088	325	372	490	206000	291440
	55	400	800.0	800.0	450.0	400.0	20.0	40.0	77.088	325	372	490	206000	288885
SM520 TMCP (163개)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	110	400	900.0	900.0	530.0	400.0	70.0	80.0	77.088	325	372	490	206000	667998
	186	600	1100.0	1100.0	730.0	600.0	80.0	80.0	77.088	325	372	490	206000	1052153
SM570 TMCP (163개)	187	300	600.0	600.0	300.0	300.0	10.0	15.0	77.088	355	372	520	206000	85346

	280	500	950.0	950.0	590.0	500.0	50.0	60.0	77.088	355	372	520	206000	624168
SM570 TMCP (163개)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	349	600	1100.0	1100.0	730.0	600.0	80.0	80.0	77.088	355	372	520	206000	1060942
	350	300	600.0	600.0	300.0	300.0	10.0	15.0	77.088	440	372	570	206000	95385

SM570 TMCP (163개)	420	400	850.0	850.0	510.0	400.0	60.0	70.0	77.088	440	372	570	206000	642382

	512	600	1100.0	1100.0	730.0	600.0	80.0	80.0	77.088	440	372	570	206000	1163187

- 콘크리트 압축강도는 21, 24, 27, 30, 35, 40, 50 MPa 7종류를 데이터베이스로 사용

150~230mm를 유지하도록 작성되었으며 매입형 합성 부재 데이터베이스의 합성 단면적과 강축 및 약 축에 대한 합성단면 계수와의 관계는 그림 6과 같다. 표 2에서 SM490 압연 H형강

과 SM490 조립 H 형강의 항복 강도는 H형강의 웨브와 플레이트의 두께가 40mm이하일 때는 325MPa, 그 이상의 두께 일 때는 295MPa의 항복 강도를 가진다. SM490TMCP,

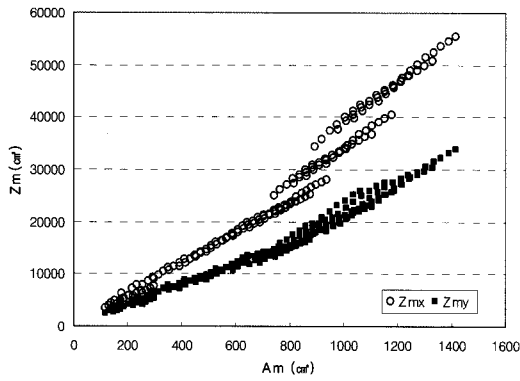


그림 6 SRC 부재 데이터 베이스의 단면 성능 관계 ($f_{ck} = 50MPa$ 일때)

SM520TMCP, SM570TMCP의 항복 강도는 플레이트의 두께와 상관없이 각각 325MPa, 355MPa, 440MPa이다.

3.2 적용 결과

목적함수와 제약함수는 식 (1)~식 (6)과 같으며, 목적함수에 사용된 콘크리트와 강종별 형강의 단가는 표 3, 표 4와 같다.

개발된 최적화 기법을 예제 건물에 적용하여 얻은 기둥 열 수렴 곡선은 그림 7과 같다. 예제는 최대 경우의 수 15^{3584} 와 5개의 제약 조건을 가지는 비교적 규모가 큰 최적화 문제임에도 최대 361 세대 내에서 안정적으로 최적 해를 찾을 수 있었다.

표 3 콘크리트 압축강도별 단가(천원/m²)

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

표 4 강종별 형강의 단가(원/ton)

강종	강판두께	제작비포함	후판가격
SM490Roll and Built-up (295MPa or 325MPa)	0 < t ≤ 25	897,100	727,100
	25 < t ≤ 38	905,800	735,800
	38 < t ≤ 50	913,700	743,700
	60 < t ≤ 100	923,100	753,100
SM490TMCP (325MPa)	0 < t ≤ 25	919,700	749,700
	25 < t ≤ 38	928,400	758,400
	38 < t ≤ 50	936,300	766,300
SM520TMCP (355MPa)	0 < t ≤ 25	928,400	758,400
	25 < t ≤ 38	937,800	767,800
	38 < t ≤ 50	945,700	775,700
SM570TMCP (440MPa)	0 < t ≤ 50	1,037,600	867,600
	50 < t ≤ 100	1,045,500	875,500

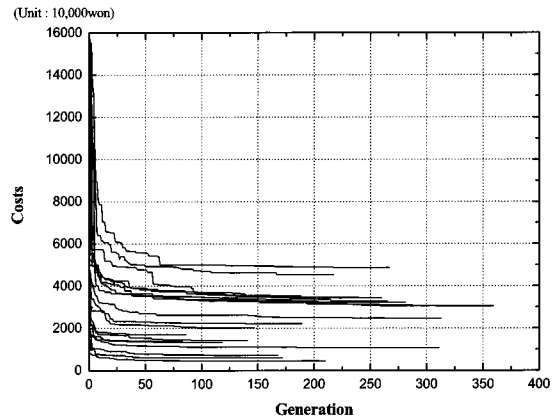


그림 7 기둥열 전체에 대한 가격 수렴곡선

표 5는 최적화 기법 적용에 따른 기둥 열별 콘크리트와 강재의 가격 및 물량을 나타낸다. 최적화 기법에 의해서 결정된 기둥의 전체 골조 비용은 1,488,637,769원이며, 기둥 열 별 평균응력비는 88.5%이다. C2A & C2C, C3A & C3C, C6A, C7, C7B 기둥열의 응력비가 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 이 기둥들의 분담하중이 작음으로 해서 건물 상층부에서 데이터베이스 중에서 제일 작은 부재를 선택함에도 불구하고 응력이 낮게 나타나기 때문이다. 이러한 현상이 아니었다면 전체 기둥 열 평균응력비가 더 높게 나타났을 것이다. 표 6, 표 7은 기둥 열별 기둥의 숫자를 고려하지 않고 각 기둥 열에서 사용된 강재와 콘크리트의 강도에 따른 비용을 정리한 것이다. 표 6에서 SM520TMCP, SM570TMCP와 같은 고강도 TMCP강의 재료비용이 전체 강재 재료비의 63%이상을 차지함을 알 수 있다. 또, SM490TMCP강은 강도에 비해 가격이 높기 때문에 전체 재료 가격의 1%이하의 비율로 선택되었다. 표 7에서 콘크리트는 강도 증가에 따른 재료가격의 증가율이 상대적으로 작으므로 압축 강도 50MPa급의 콘크리트가 전체 가격의 82%이상을 차지하는 것으로 나타났다.

그림 8은 높이에 따른 강재의 강종 분포를 보여 주는 것으로서 그래프 안의 번호는 매입형 합성 부재 데이터 베이스의 부재 번호를 나타내는 것이다. 이 그래프를 통해 주로 저층부에 SM570TMCP, SM520TMCP 등의 고강도강재가 선택되었고 상층부에서는 일반 강도의 강재가 선택되고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 콘크리트의 압축 강도 수직 분포를 보여주는 것으로서 주로 저층부에서 높은 강도의 콘크리트가 선택되고 고층부에서는 낮은 강도의 콘크리트가 선택되고 있음을 알 수 있다.

표 5 기동열 별 가격 및 물량 비교

기동종류	개수	최적화 결과											응력비 (%)	
		가격(원)						무게(tonf)						
		강재					콘크리트	합계 (개수고려)	철골	콘크리트 (개수고려)				
SM490 Roll	SM490 Built-up	SM490 TMCP	SM520 TMCP	SM570 TMCP	소 계									
C1,C1C	4	446,338	9,142,021	3,358,286	19,808,624	8,232,174	40,987,442	5,822,391	187,239,331	43.05	164.07	828.49	92.3	
C1A	2	0	0	0	15,225,293	0	15,225,293	1,924,471	34,299,527	16.02	53.09	138.22	94.0	
C1B,C1D	2	3,718,704	3,857,101	0	6,721,910	0	28,692,524	42,990,238	5,678,527	97,337,531	44.00	161.69	411.38	93.1
C2,C2B	8	5,696,337	2,194,865	0	12,717,619	0	20,608,821	4,108,761	197,740,656	23.75	116.55	1122.41	92.1	
C2A,C2C	4	4,916,179	4,265,347	0	2,325,388	0	11,506,914	2,797,275	57,216,759	13.96	90.73	418.75	73.7	
C3,C3B	4	5,016,986	7,853,231	0	5,171,941	0	18,042,159	4,127,223	88,677,528	21.02	118.01	556.11	91.4	
C3A,C3C	2	5,891,185	791,699	0	1,682,008	0	8,364,892	2,365,574	21,460,932	10.80	85.07	191.73	76.8	
C4,C4B	4	6,545,398	2,194,865	0	0	18,508,221	27,248,484	5,050,840	129,197,297	29.15	140.77	679.66	92.7	
C4A	4	5,084,851	5,391,024	0	20,146,993	0	30,622,868	5,197,810	143,282,712	34.15	146.71	723.45	90.8	
C5,C5B	4	1,877,945	8,935,031	0	3,375,128	11,523,426	25,711,529	4,772,838	121,937,469	27.13	139.15	665.10	91.7	
C5A	4	3,315,458	6,029,655	0	4,042,543	12,408,223	25,795,879	4,792,246	122,352,500	27.43	135.45	651.51	91.0	
C6	2	2,761,435	7,998,865	0	12,902,508	5,656,116	29,318,924	5,020,207	68,678,262	31.63	147.12	357.51	91.0	
C6A	4	4,910,463	3,345,303	0	5,604,149	3,106,606	16,966,520	3,275,829	80,969,396	19.37	118.67	552.19	80.1	
C6B	2	2,427,972	10,123,626	0	3,375,128	12,118,956	28,045,682	4,852,579	65,796,523	29.79	137.15	333.87	95.6	
C6C	2	0	0	0	4,073,454	7,728,089	11,801,542	1,549,615	26,702,314	11.69	42.75	108.87	93.2	
C6D	2	0	0	0	7,418,598	4,997,093	12,415,691	1,539,667	27,910,715	12.59	42.47	110.12	96.7	
C7	1	3,859,363	0	0	0	1,530,924	5,390,287	1,823,392	7,213,679	6.78	55.82	62.61	83.0	
C7A	1	2,182,099	1,323,622	0	0	0	3,505,721	1,066,632	4,572,353	4.48	38.72	43.19	89.6	
C7B	1	4,618,280	0	0	0	0	4,618,280	1,434,005	6,052,285	6.35	46.38	52.73	73.0	
계	57	63,268,994	73,446,254	3,358,286	124,591,282	114,502,350	379,167,167	67,199,882	1,488,637,769	413.13	1980.36	8007.89	88.5	

표 6 최적화에 따른 강재의 재료비용

강종	가격(원)	비율(%)
SM490Roll	63,268,994	16.69
SM490Built-up	73,446,254	19.37
SM490TMCP	3,358,286	0.89
SM520TMCP	124,591,282	32.86
SM570TMCP	114,502,350	30.20
합	379,167,166	100

표 7 최적화에 따른 콘크리트의 재료비용

압축강도(MPa)	가격(원)	비율(%)
21	3,104,478	4.62
24	144,580	0.22
27	328,238	0.49
30	212,404	0.32
35	2,854,305	4.25
40	5,323,235	7.92
50	55,232,643	82.19
합	67,199,883	100

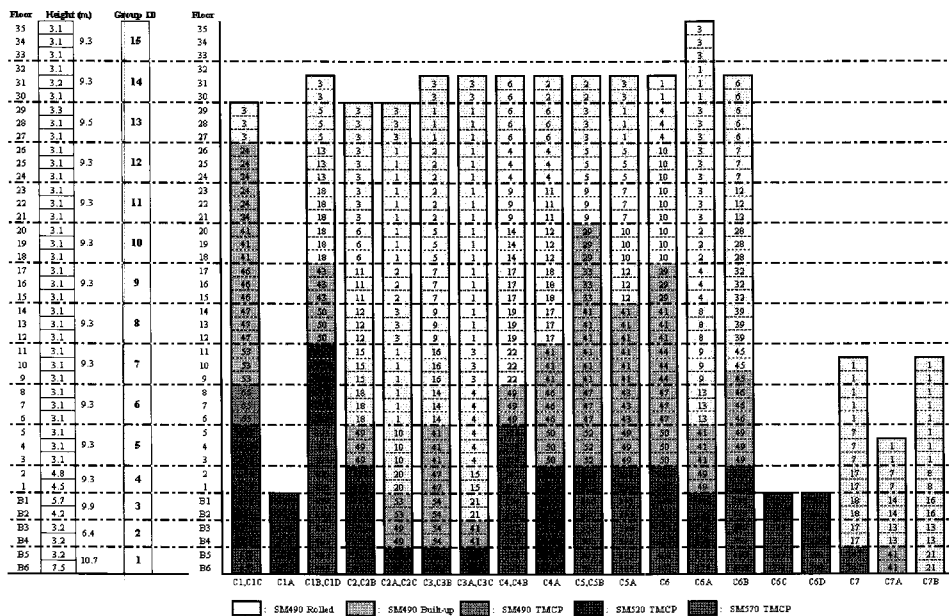


그림 8 강재의 강도 분포

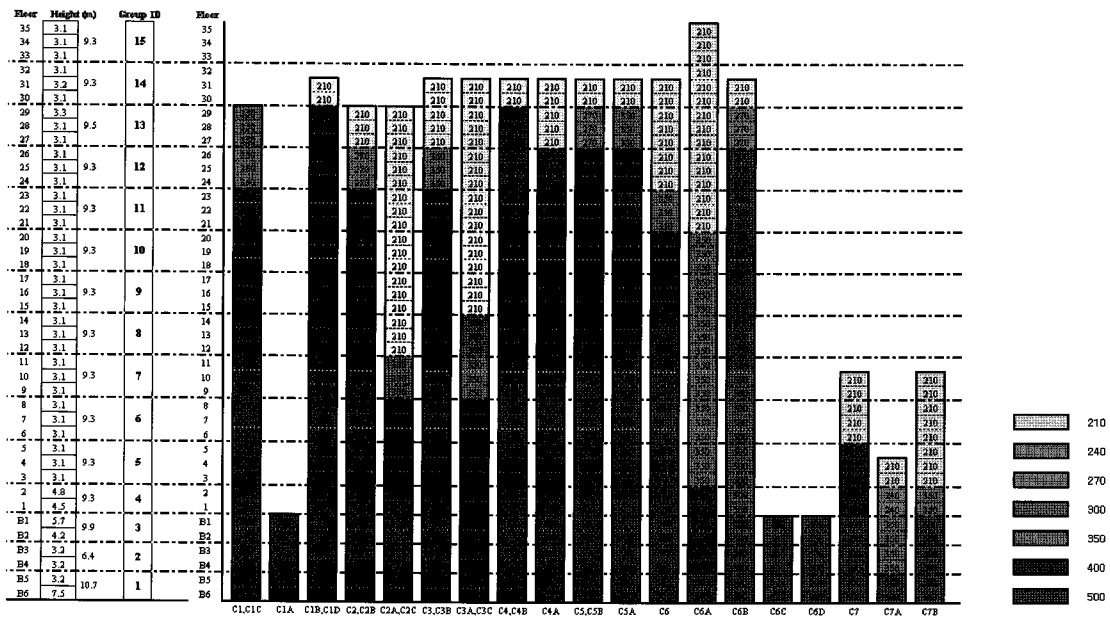


그림 9 콘크리트의 강도 분포

4. 결 론

초고층건물의 출현과 더불어 구조용 고강도강재가 생산되고 있으나 아직 고강도강재를 이용한 효율적인 초고층건물 설계 방법 및 설계 지침이 개발되어 있지 못하다. 그러므로 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용하여 고강도강재를 사용한 건물골조방식 초고층건물의 구조비용 최적설계 기법을 개발하였다. 개발된 최적화 기법은 재료의 강도별 비용을 고려하여 최적의 구조비용을 얻을 수 있는 알고리즘으로서, 37층 골조 방식 건물의 기둥 열별 비용 최적화 문제에 적용하여 개발된 최적화 기법의 성능과 안정성을 평가하였다.

먼저, 파라미터 스터디를 통한 적절한 별칭 상수와 모집단의 크기, 종료 조건을 설정하여 개발된 최적화 기법의 안정성을 확보하였다. 결정된 파라미터를 근거로 하여 개발된 최적화 기법을 35층 예제의 기둥 열별 비용 최적화에 적용한 결과, 기둥 열별 평균응력은 88.5%수준을 유지하며 최대 361세대 내에서 안정적으로 기둥의 최적 구조비용을 산출 할 수 있었다. 그림 8의 강재의 강도 분포와 그림 9의 콘크리트 강도 분포를 통해 초고층건물의 저층부에 고강도 강과 높은 압축 강도의 콘크리트를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 표 6에 정리된 최적화 기법으로 얻어진 강종별 가격의 비율을 보면, SM570TMCP, SM520TMCP, SM490TMCP, SM490 Built-up, SM490Roll이 각각 30.2%, 32.9%, 0.9%, 19.4%, 16.7% 로서 SM570TMCP, SM520TMCP과 같은 고강도 강 사용이 비용 측면에서 효율적임을 알 수 있다.

이처럼 개발된 최적화 기법은 초고층건물의 구조비용을 최적화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 고강도 재료의 사용 위치와

사용 양에 대한 개략적인 정보를 제공하여 준다. 일반적으로 초고층건물은 기둥의 강성이 변하더라도 전체 횡 강성과 기둥의 부재력은 큰 변화가 없으므로, 개발된 최적화 기법은 건물 골조 방식이외의 초고층건물 구조비용 최적화에도 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

건축구조설계기준 (2005). 대한건축학회, 서울, 대한민국
 임성우, 장인화 (2003) 고장력(SM570) 강재의 기둥재 특성에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 15(1).
 임성우, 장인화, 박홍근, 정봉수 (1999) 고층 건물에서 고장력강의 효율성. 한국강구조학회 학술발표대회, 10. pp.141~146.
 장인화 (2002) 고강도강의 건축구조 적용, 초고층 구조시스템의 새로운 방향, 대한건축학회 세미나.
 KBC 2005 강구조 설계 (2005), 한국강구조학회, 서울, 대한민국.
 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, CTBUH, Hong Kong, pp.545~553.
 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, Los Angeles, CA, pp.91~98.

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., Toppong B.H.V. (1999) Parallel simulated annealing for structural optimization,

Computer and Structure, 73, pp.545~564.

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., 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.

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

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