

직접탐색을 이용한 유전자 알고리즘에 의한 RC 프레임의 최적설계

Integrated Genetic Algorithm with Direct Search for Optimum Design of RC Frames

곽 효 경† 김 지 은*

Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Jieun

(논문접수일 : 2007년 9월 4일 ; 심사종료일 : 2007년 11월 13일)

요 지

이 논문에서는 철근콘크리트 프레임 구조물을 대상으로 직접탐색기법을 도입하여 보다 개선된 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 기법을 제안하고 있다. 먼저 유전자 알고리즘을 이용하여 다양한 초기 가정 단면을 발생시키고, 이로부터 도출되는 각 설계 부재력 조건에 대해 미리 구성된 설계 단면 데이터베이스(DB)를 기반으로 회귀분석과 직접탐색을 이용하여 최적해를 도출한 후 여러 세대에 걸쳐 누적된 결과로부터 전역 최적해(global minimum)를 선택하였다. 제안된 알고리즘은 일반적인 유전자 알고리즘만을 이용할 경우 전역 최적해에 도달하기까지 수렴성이 떨어져서 그 결과 해의 적합도(Fitness)가 저하되는 단점을 보완하여 빠른 수렴성과 함께 최종해의 경제성에서도 향상된 결과를 보인다.

또한, 작용 하중 조건 하에서 전 부재가 최대의 효율로 저항함으로써 보다 경제적인 설계가 되도록 하기 위하여 비선형 해석을 수행하여 도출된 부재력을 바탕으로 설계 단면을 결정하였으며, 제안된 알고리즘을 예제 구조물에 적용하여 그 효율성을 검증하였다.

핵심용어 : 유전자 알고리즘, 데이터베이스, 회귀분석, 직접탐색, 비선형해석

Abstract

An improved optimum design method for reinforced concrete frames using integrated genetic algorithm(GA) with direct search method is presented. First, various sets of initially assumed sections are generated using GA, and then, for each resultant design member force condition optimum solutions are selected by regression analysis and direct search within pre-determined design section database. In advance, global optimum solutions are selected from accumulated results through several generations. Proposed algorithm makes up for the weak point in standard genetic algorithm(GA), that is, low efficiency in convergence causing the deterioration of quality of final solutions and shows fast convergence together with improved results.

Moreover, for the purpose of elevating economic efficiency, optimum design based on the nonlinear structural analysis is performed and therefore makes all members resist against given loading condition with the nearest resisting capacity. The investigation for the effectiveness of the introduced design procedure is conducted through correlation study for example structures.

Keywords : genetic algorithm, database, regression analysis, direct search, nonlinear analysis

1. 서 론

철근콘크리트(RC) 부재는 단면 치수, 철근의 개수와 위치 등 설계변수가 다양하여 최적해에 이르는 과정이 복잡해지고 각 설계변수가 이산형(discrete value)의 값을 가지는 특징이 있다(Ferreira 등, 2003; Govindaraj 등, 2005). 그

럼에도 불구하고 많은 연구자들에 의해 연속이고 미분 가능한 목적 함수와 연속해로 도출되는 설계변수를 이용하는 수학적 프로그래밍(mathematical programming)을 기반으로 RC 부재의 최적설계가 수행된 바 있다(Camp 등, 2002). 이와는 달리 실제 RC 부재의 경우 시공상의 편의를 위해 기둥, 보 등의 부재 치수가 일반적으로 5cm(2in.) 단

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

Tel: 042-869-3621 ; Fax: 042-869-3610

E-mail: khg@kaist.ac.kr

* 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC) 연수연구원

* 이 논문에 대한 토론을 2008년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

위로 차이를 두어 설계되고 철근의 배치 또한 설계 규준상의 제한을 받으므로(KCI, 1999), 이를 반영하여 현실적인 설계 단면에 대한 데이터베이스(DB)를 구축하고 이로부터 설계에 바로 이용 가능한 해를 도출하고자 하는 시도 또한 이루어져 왔다(곽효경 등, 2007).

그러나 철근콘크리트 부재의 특성상 데이터베이스 내에 유사한 저항 능력 범위에서 다양한 설계 단면이 존재함에 따라 검색된 해의 인접 영역에서 제한 조건에 가장 부합하는 해를 찾기 위해 면밀한 검토가 요구되고, 초기 가정 단면의 조합에 따라 최종 설계 결과가 어느 정도 차이를 보이게 되어 전역 최적해(global minimum)를 도출하기 위해서는 다양한 단면 조건에 대한 시험 설계가 요구된다. 특히 비선형해석에 따른 최적설계를 수행하는 경우 각 부재의 최대 저항 능력에 해당하는 부재력만 부담하고 나머지 부재력은 인접 부재로 분산시키게 되므로, 초기 단면의 가정이 최종 설계 결과에 직접적인 영향을 주어 전역 최적해를 보장할 수 있는 장치가 필수적이다. 이와 같은 맥락에서 진화론적 기법으로 알려진 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)을 도입하여 전역 최적해를 산정하는 최적설계 기법이 제안되어 오고 있다(Holland, 1975; Hrstka 등, 2003; Beyer, 2001).

그러나 표준적인 유전자 알고리즘만을 이용하여 최적설계를 수행할 경우 계산상의 부담이 매우 크게 되고 계산 시간이 많이 소요되는 단점 외에도 최적화 수행 범위 내에서 제대로 수렴값에 도달하지 못하여 결과에 대한 신뢰도가 떨어지는(Andre 등, 2001) 단점이 있어, 이를 보완하기 위해 신경망 이론을 도입하여 개선된 알고리즘을 이용하거나(Salajegheh 등, 2005; Yang 등, 2004) 비선형 프로그래밍 기법인 Hook와 Jeeves의 방법을 결합하는 등(Sahab 등, 2005) 다양한 시도가 있어 왔다. 특히, 신경망 이론은 유전자 알고리즘만을 적용하는 경우에 비해 계산 시간을 단축시키는 장점이 있다. 그러나 최선의 결과를 얻기 위해 적절한 신경망의 종류와 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되는 신경망 구조 및 학습을 시키기 위한 가중치 등의 주요 요소들을 결정하고 이들을 시스템으로 구현한 후 이로부터 얻어지는 해의 수렴성 및 유용성에 대한 검토 작업이 별도로 요구되는 어려움이 있다(김남희 등, 2001; Srinivas 등, 2006).

따라서 이 논문에서는 전술한 바와 같은 유전자 알고리즘 적용상의 어려움을 개선함으로써 수렴성과 함께 보다 경제적인 설계인지 여부로 평가되는 해의 적합도(Fitness)를 동시에 향상시키기 위하여 이전 연구(곽효경 등, 2007)에서 수행하였던 바 있는 데이터베이스에 대한 회귀분석과 직접탐색을 도입하였다. 데이터베이스를 도입하게 되면 유전자 알고리즘을 이용하여 반복적으로 시험해를 선택하는 과정에서 무

작위로 선택되는 대상해가 실무상의 제한 조건을 이미 만족시키고 있는 현실적인 설계 단면을 나타내게 되고, 각 반복 단계마다 달라지는 부재력 분포 양상에 가장 부합하면서도 경제적인 해를 단순히 임의성에 의해서가 아닌 회귀분석식과 초기해 인접 영역에서의 직접탐색을 통해 도출하게 되므로 빠르게 전역 최적해에 접근하게 된다. 이를 통해 단순한 이론적 배경으로 적용이 용이한 최적화 알고리즘을 이용하면서도 신뢰할 수 있는 전역 최적해의 도출이 가능하도록 하였으며 기존 연구와의 비교를 통해 제안된 방법의 효율성을 입증하고자 한다.

2. 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계

2.1 유전자 알고리즘의 구조

기동과 보 부재의 데이터베이스로부터 단면 번호로 나타내어지는 임의의 수 n 개의 해를 임의로 추출하여 해집단으로 삼고, 이 해집단 각각의 해에 대한 적합도 함수(Fitness function, 여기서는 가격 함수)를 산정함으로써 해의 적합도를 평가한 후 선택(selection), 교차(crossover), 변이(mutation)의 연산을 거쳐 다시 n 개의 새로운 해를 만들어 낸다. 이러한 과정을 정지 조건이 만족될 때까지 수행한 후 가장 좋은 결과를 주는 해를 최종해로 선택하는데, 여기서 사용한 정지 조건(termination condition, Michalewicz, 1999)은 지정된 세대수만큼 유전자 알고리즘에 따른 최적설계를 수행하는 방식이다(문병로, 2003).

해집단을 구성하는 해를 이진수의 조합으로 이루어진 염색체로 표현하기 위해 데이터베이스의 최대 단면 번호가 만약 2500이라고 할 때 식 (1)과 같이 이진수로 분해하여 이진 문자열의 최대 자리수를 결정하고 각 자리의 숫자를 0과 1 중 임의로 선택하여 모든 해를 표현 가능하도록 하게 된다.

$$2^{11} < 2500 = 2^{11} + 2^8 + 2^7 + 2^6 + 2^2 \\ = 100111000100 < 2^{12} \quad (1)$$

식 (1)로부터 12개의 이진 문자열로 나타내어진 해는 최적설계 과정에서 단면 번호로 대표되는 저항 강도, 치수 정보, 단면 가격 등의 정보를 이용하기 위해 데이터베이스(곽효경 등, 2007) 내의 실제 해를 나타내는 실수해로 표현될 필요가 있다. 그 과정은 다음 식 (2), (3)의 두 단계로 이루어지며, 먼저 이진 문자열 $\langle b_1, b_0 \dots b_0 \rangle$ 을 십진수 x' 로 변환한 후 실제 데이터베이스의 실수해 범위 $\langle N_{\min} \dots N_{\max} \rangle$ 를 이용하여 해당되는 실수해 x 로 나타내게 된다. N_{\min} 은 일반

적으로 1이 되며, N_{max} 는 기둥과 보 데이터베이스의 최대 단면 번호를 나타낸다.

$$\langle b_1 b_{10} \dots b_0 \rangle_2 = \left(\sum_{i=0}^{11} b_i \cdot 2^i \right)_{10} = x' \quad (2)$$

$$x = N_{min} + x' \cdot \frac{|N_{max} - N_{min}|}{2^{12} - 1} \quad (3)$$

일반적인 유전자 알고리즘에서는 해의 적합도를 평가하기 위해 벌칙함수 등을 도입하여 적합도 함수를 구성하고 시험 대상 해의 제약 조건에 대한 만족도를 평가하고 있다. 이 논문에서는 임의 선택된 초기 가정 단면에 무관하게 최적설계 과정에서 주어진 제약 조건을 모두 만족하는 최종해를 도출하고 있으므로 이러한 적합도 함수를 별도로 구성하는 것이 불필요하다. 따라서 가격 함수를 이용하여 각 초기 단면 조건에 대해 결정된 최종해의 적합도를 평가하는 것이 가능하게 되고, 가장 경제적인 결과를 주는 해가 경쟁력 우위에서 도록 설정하였다. 즉, 가격 함수가 목적 함수로서의 역할과 함께 적합도 함수의 기능을 수행하도록 하기 위하여 다음과 같이 나타내고 이 함수값의 음수(-)를 취하여 이를 최소화시키는 방향으로 해를 진화시킨다.

$$f(x) = \sum_{m=1}^{col} C_c(x_m) \cdot len_c + \sum_{n=1}^{beam} C_b(x_n) \cdot len_b \quad (4)$$

여기서, col , $beam$, C_c , C_b , len_c 및 len_b 는 각각 기둥 부재와 보 부재의 개수, 기둥의 해당 실수해에 대한 단면 가격, 보의 단면 가격, 기둥 부재와 보 부재의 길이를 나타낸다.

이 때 임의로 생성된 염색체를 대상으로 유전자 알고리즘의 각 연산자를 통한 변환과정을 거쳐 새로운 다음 세대의 해를 생성하게 되는데(양영순 등, 1995), 교차 확률(p_c)과 돌연변이 확률(p_m)을 도입하여 이를 해집단의 크기와 곱해서 (p_c or $p_m \cdot pop_size$) 임의로 생성된 0과 1 사이의 수 r 과 이 값을 비교함으로써 교차 및 돌연변이 여부를 결정한다(Michalewicz 1999). 즉, 교차를 통해 좋은 결과를 내는 해 주위로 다음 세대에서의 해를 다수 생성시키면서도 과도하게 한쪽 방향으로만 치우치는 것을 돌연변이를 통해 보완하여 다양한 해에 대한 시험이 가능해지도록 함으로써 전역 최적해로서의 가능성을 높일 수 있다.

2.2 제약 조건의 처리

제약조건을 다루는 보편적 기법인 벌칙 함수(penalty function)를 이용하는 경우(Lee 등, 2003; Chau 등, 2002) 많은 수의 벌칙 변수를 포함하게 되어, 적절한 변수를 설정하

고 이 변수들에 적합한 값을 부여하는 복잡한 과정을 거쳐야 하는 단점이 있다(Deb, 2000). 따라서 이 논문에서는 벌칙 함수를 도입하지 않고 유전자 알고리즘을 이용하여 가정된 초기 단면에 대해 회귀분석과 직접탐색을 도입하여 제약 조건을 만족하는 해를 찾고자 하였다. 즉, 설계 기준과 실무상의 제한 조건들을 만족하는 설계 단면들로 구성된 데이터베이스로부터 선택된 최종해는, 구조해석 결과에 따라 도출된 설계 부재력을 만족하면서도 인접 영역에 대한 검색을 통해 가장 경제적인, 최적설계의 목적에 부합하는 해가 되는데 이 때 사용되는 제약 조건은 다음과 같다.

$$(M_u, P_u) \leq (\phi M_n, \phi P_n) \text{ for columns:}$$

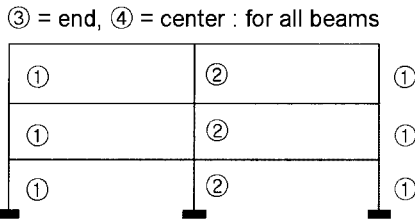
$$|M_u^\pm| \leq |\phi M_n^\pm| \text{ for beams} \quad (5)$$

여기서, M_u , P_u , M_u^\pm 및 ϕM_n , ϕP_n , ϕM_n^\pm 는 각각 발생 부재력인 기둥의 극한 휨모멘트, 기둥의 축력, 보의 휨모멘트와 강도감소계수가 고려된 부재 저항 능력인 기둥의 공칭 휨강도, 기둥의 공칭 축강도 및 보의 공칭 휨강도를 나타낸다.

즉, 이 논문에서 사용하고 있는 유전자 알고리즘은 최적설계의 최초 반복 단계를 시작하기 위한 구조해석 이전 단계에서 가정 단면을 다양하게 발생시키는 역할에 국한되며, 제약 조건은 유전자 알고리즘과는 무관하게 구조해석 결과를 토대로 최적설계를 수행하기 위한 회귀분석식의 적용과 직접탐색에 의해 만족시킨다. 실무에서 엔지니어는 먼저 가정 단면에 대해 구조 해석을 수행하고, 발생한 부재력 이상의 단면 저항 능력을 가지는 단면 치수 및 배근 조건으로 설계를 수행하게 되므로 결과적인 설계 단면은 가정 단면과는 차이가 발생하게 된다. 그러나 벌칙 함수를 도입하는 경우 가정된 단면이 결과 부재력을 만족하는지 여부를 검토하게 되므로 최종 설계 단면이 가정 단면과 동일하다는 가정 하에서 최적설계가 수행되는 문제점이 발생하는데, 이 논문에서는 이를 회귀분석과 직접탐색을 도입함으로써 해결하고자 하였다.

2.3 해의 지정과 표현

프레임 구조물은 하중 조건과 시공상의 이유로 인해 3개 층을 중심으로 동일한 부재로 설계하는 등 구조계에 대한 그룹화(grouping)가 이루어지는 것이 일반적이다. 한편 유전자 알고리즘은 반복 과정에서 해의 선택에 있어 임의성을 특징으로 하므로 검색해야 할 해의 개수가 많아질 경우 수렴성이 저하되어 해를 세분화함으로써 얻는 경제적 측면의 이점을 기대하기 어렵게 된다. 따라서 이 논문에서는 실제 구조계에서 나타나는 부재의 그룹화를 반영하여 각 기둥과 보 부



$$\{col1, col2, beam_end, beam_cent\} = \begin{Bmatrix} 1001110001\ 00 \\ 1000011010\ 00 \\ 0111001110\ 00 \\ 1000101001\ 11 \end{Bmatrix}$$

그림 1 그룹화에 따른 대상 해의 지정

표 1 유전자 알고리즘 가동 변수

변수	값
가정 단면 조합 수 IZ	50
세대 수(generation) NGEN	50
교차 확률 CP	1.0
돌연변이 확률 MP	0.1
데이터베이스의 최저 단면 번호 XL	1
데이터베이스의 최대 단면 번호 XB	2451(기둥) 또는 2239(보)

재를 적절한 개수의 그룹으로 묶어 각 그룹 내의 부재력 중 최대 부재력 조건을 추출하여 이를 최적설계에 이용함으로써 유전자 알고리즘이 갖는 한계와 어려움을 극복하고자 하였다. 이 때 실무에서 보 설계시 단부와 중앙부를 구분하여 각각 설계하는 현실을 반영하여, 단부와 중앙부에 대한 설계 단면을 개별적인 해로 선택하였다.

그림 1은 2경간 3층의 간단한 프레임 구조물에 대해 검색 대상해를 선정하는 예를 보여주고 있다. 그림 1에서 번호로 표기한 바와 같이, 기둥 부재는 외측과 중앙부 기둥을 구분하여 두 종류로, 보 부재는 수직하중만 작용하는 경우 층별에 따른 부재력 분포 양상이 동일하므로 전 층에 대해 동일하게 단부와 중앙부만을 구분하여 두 종류로 그룹화하였다. 이 네 개의 해를 조합하여 전체 구조물을 표현하는 염색체 그룹으로 데이터베이스로부터 임의로 추출하게 되는데, 단면 데이터의 개수가 2500개인 각 해당 데이터베이스 범위 내의 모든 단면 번호를 2진수로 표현할 수 있도록 12자리의 이진 문자열로 나타내며 그 예를 그림 1에서 살펴볼 수 있다. 즉, 기둥 부재 ①의 가정된 단면 번호는 $2^2 + 2^6 + 2^7 + 2^8 + 2^{11} = 2500$ 이며, 이 때 산출된 값은 식 (3)에 따라 단면 데이터의 상한인 2500과 하한인 1을 경계로 보정을 통해 유전자 알고리즘을 적용하기 위한 가정된 단면의 단면 번호를 결정하게 된다.

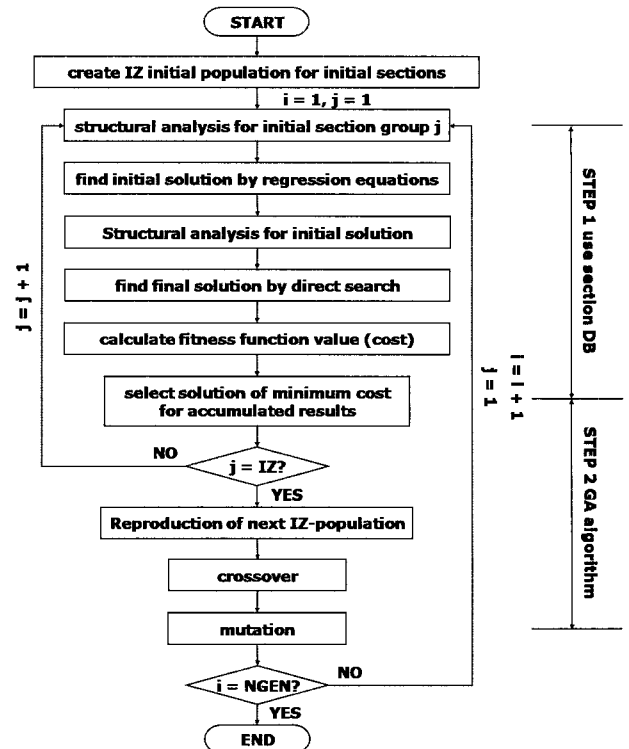


그림 2 단면 DB와 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계 알고리즘

2.4 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계 과정

프레임 구조물의 최적화를 수행하는 과정에서 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 새로 설정되어야 하는 변수들을 표 1에 나타내었으며, 각 변수의 값은 대상 구조물과 데이터베이스의 규모 및 해의 수렴 속도를 조절하기 위해 적절히 조정하여 이용할 수 있다. 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이 이 논문에서는 12개(NB=12bit)의 0 또는 1의 인수로 이루어진 문자열 형태의 염색체(그림 1 참조)로 표현되는 4개(N)의 초기 가정 단면을 하나의 그룹으로 설정하였다. 이러한 그룹을 임의로 50개(IZ)씩 생성시켜 각 그룹에 대해 최적설계를 수행하고, 그 중 가장 최적에 가까운 해 그룹과 유사한 범위에서 교차와 돌연변이를 통해 다시 새로운 50개의 해 그룹을 생성시켜 동일한 과정을 수행한다. 이러한 반복 과정을 총 50개(NGEN)의 세대 수만큼 수행하며, 다음 세대의 해 그룹 생성을 위한 교차 확률(CP)과 돌연변이 확률(MP)을 각각 1.0, 0.1로 설정하였다. 또한 이진수로 나타내어진 염색체의 실제 실수로서의 값의 범위(XL, XB)를 부재 종류에 따라 부여한다.

각 초기 가정 단면 해 그룹으로부터 도출된 최적해의 평균 가격 함수로 설정된 적합도 함수(fitness function) 값을 비교함으로써 보다 나은 결과인지 여부를 결정하며, 가장 경제적인 가격을 도출하는 초기 가정 단면 그룹이 보다 우수한

유전자 그룹으로 간주되고 다음 세대에서 살아 남게 되어 점차 개선된 가정 단면으로의 진화를 유도한다. 최적설계 과정의 개요를 그림 2에 흐름도로 나타내었으며, 최적설계 과정에 이용되는 회귀분석식과 직접탐색에 의한 최종해의 검색 과정은 이전에 발표한 논문(곽효경 등, 2007)에 자세히 소개한 바 있으므로 여기서는 구축된 데이터베이스를 기반으로 회귀분석과 직접탐색에 의해 연속 초기해 및 불연속 최종해를 검색하는 과정을 간략하게 나타내면 다음과 같다. 여기서 이용된 유전자 알고리즘은 Belegund 등(1999)의 저서로부터 인용하였으며, 시험 대상 유전자들을 임의로 선택하여 새로운 풀을 형성하는 과정(reproduction)에서는 각 해의 적합도에 비례하여 좋은 해가 다음 세대로 선택될 가능성을 높이는 룰렛휠 선택법을, 부모 세대의 유전자로부터 자식 세대의 새로운 유전자를 생성하기 위한 교차 연산에는 임계 확률을 도입하여 자름선을 이용하지 않는 균등 교차(uniform crossover)를 이용하였다.

3 데이터베이스에 의한 최적해의 결정

사각형 RC 기둥과 보 단면 데이터베이스는 강도설계법을 적용하여(한국엔지니어링진흥협회, 2004) 콘크리트구조설계기준(1999)에 따라 구성하였으며, 기둥의 경우 설계변수인 단면의 폭(B)과 높이(H), 각 변 및 모서리부에 배근된 철근의 개수, 철근비, 강도감소계수가 고려된 P-M 상관도와 콘크리트, 철근 및 거푸집을 포함한 단면 가격을 포함하고, 보에 대해서는 강도 감소된 극한휨모멘트를 토대로 단면 데이터베이스를 구축하여 단면의 폭(B)과 높이(H), 인장 및 압축철근 개수와 단면 가격을 포함하였다. 이와 같이 생성된 데이터베이스는 설계 단면의 저항 능력(capacity)을 대표한다고 가정한 P-M 상관도의 면적(기둥) 또는 극한휨모멘트

(보)의 오름차순으로 정렬한 후 단면 번호를 부여하였다. 보다 상세한 데이터베이스 구축 과정은 참고문헌(곽효경 등, 2007)에서 자세히 살펴볼 수 있다.

구축된 기둥과 보 설계 단면의 데이터베이스를 이용한 최적설계를 수행하기 위해 각 데이터베이스의 단면 번호와 설계 단면의 외력에 대한 저항 능력(capacity) 간의 관계를 회귀분석을 통해 식으로 도출한 후, 주어진 부재력 조건에 따른 수식을 이용하여 1차적인 해를 추정함으로써 데이터베이스 내에서 최적의 해를 결정하기 위한 초기점(starting point)으로 설정하였다. 이 때 구조해석에 이용된 부재 단면과 설계 단면간에 일관성을 유지하기 위하여 철근과 콘크리트를 모두 고려하여 산정한 휨강성 EI_r 및 축강성 EAm 을 이용하여 구조해석을 수행하였으며, 연속해를 도출하기 위한 반복과정에서는 보다 빠른 수렴을 위하여 이 강성값을 회귀분석식으로 표현하여 이용하고 불연속해 도출 과정에서 수정된 실제 강성값을 이용하였다.

회귀분석식을 이용한 $N_{initial}$ 이 결정되면, $[N_{initial} - \epsilon_1, N_{initial} + \epsilon_2]$ 범위에서 설계 부재력 조건을 만족시키는 최소 가격에 해당하는 단면, 즉 최초의 불연속 최적해를 찾기 위한 검색을 수행하고, 이렇게 결정된 단면과 다시 그 다음 인접 영역에서의 제한 조건에 부합하는 최소 가격 단면과의 연속적인 비교를 통해 최종해를 도출한다. 이 때 ϵ_1 및 ϵ_2 는 $N_{initial}$ 에 해당하는 강성값의 분포폭에 따라 결정되는 값으로, 이와 관련한 내용과 회귀분석과 관련한 관계식 및 최종해 검색을 위한 직접탐색 과정은 앞의 연구와 동일한 관계로 그 자세한 내용은 참고문헌(곽효경 등, 2007)에서 살펴볼 수 있다.

4. 비선형해석 및 설계

강도설계법(KCI, 1999)에 따라 구성한 이 논문의 최적설

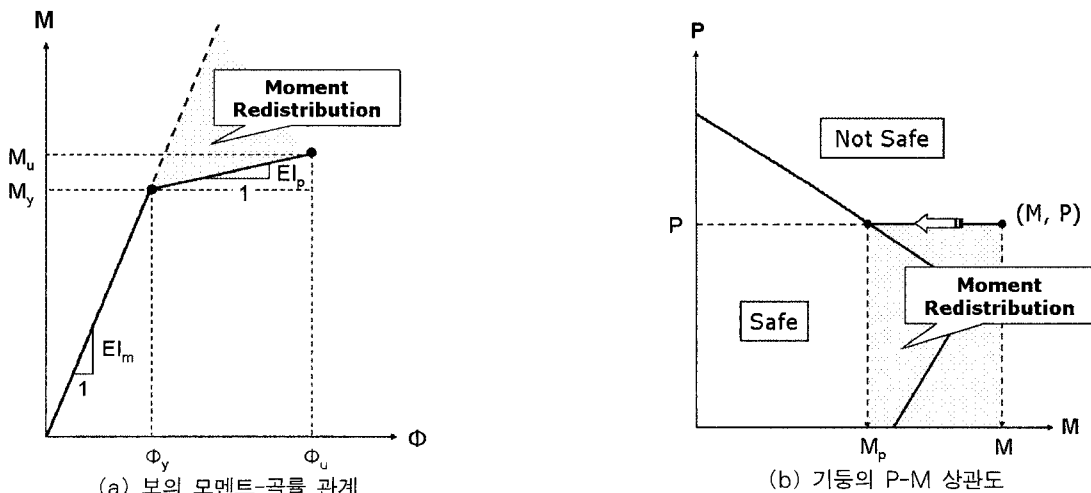


그림 3 비선형해석을 위한 부재의 소성 거동

계 알고리즘은 탄성해석과 비선형설계에 기반한 설계법으로, 보 부재와 같이 단부와 중앙부에 대해 각각 설계를 수행할 경우 시공성을 감안하여 부재력이 큰 쪽을 기준으로 치수를 통일하고 배근을 조정하게 된다. 이 경우 작용 하중에 대해 전 단면이 효율적으로 거동하지 않고 어느 한 쪽은 보수적으로 설계가 되는 단점이 있다. 반면 한계상태 설계법(limit state design, 한국엔지니어링진흥협회, 2002; Eurocode 2, 2004; CEB-FIP, 1990)의 개념을 도입하면 극한하중 작용 하에서 부재 내에 소성힌지가 발생한 후 휨모멘트가 재분배되어 일반적으로 보다 큰 부모멘트가 감소하고 정모멘트가 증가하여 두 값이 유사한 범위로 조정이 됨으로써 전 단면의 설계 효율을 증대시킬 수 있게 된다.

이를 위해 구조해석시 기둥과 보 부재에 소성힌지를 발생시키기 위해 각 단면의 소성모멘트 값을 산정하고 소성힌지 발생 이후 부재의 모멘트-곡률 관계를 설정하여 설계에 반영하였다. 이 때 휨모멘트에 의해서만 영향을 받는 보 부재의 경우 소성모멘트의 산정이 비교적 용이하나 축력과 휨모멘트의 영향을 동시에 받는 기둥 부재의 경우는 기둥의 단면 성능을 대표하는 P-M 상관도를 토대로 주어진 가정 단면에 대한 소성모멘트를 산정하게 되며 구성되는 부재의 저항력은

그림 3과 같다. 특히 기둥의 경우 휨모멘트의 재분배는 구조 해석 단계에서 이루어지므로 강도가 저감되지 않은 P-M 상관도를 이용하고 구조해석이 완료되어 도출한 설계 부재력에 대해 설계 단면을 검색할 때 강도감소계수가 사용된 P-M 상관도를 사용하였다. 구조해석시 부재력인 휨모멘트 및 축력이 그림과 같이 P-M 상관도의 외부에 위치하게 될 경우 동일한 축력의 연장선상에서 P-M 상관도와 만나는 지점의 모멘트 값을 소성모멘트로 가정하여 그 이상의 부재력을 인접 부재로 재분배하였다.

5. 최적설계

제안된 유전자 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행하고, 유전자 알고리즘을 적용하지 않고 회귀분석과 직접탐색에 의해서만 최적설계를 수행한 경우와 그 결과를 비교하였다. 또한, 선형해석과 비선형해석을 각각 수행하고 최적설계 결과를 비교·검토하였다.

5.1 3경간 3층 프레임

대상 예제는 Lee와 Ahn(2003)이 제안한 벌칙 함수를 이용한 일반적인 유전자 알고리즘에 기반하여 데이터베이스로부터 최적해를 검색하는 연구에서 이용된 3경간 3층 프레임 구조물이다. 작용 하중은 16.5kN/m의 고정하중과 7.2 kN/m의 활하중이며 각각 1.4, 1.7의 하중 계수를 적용하고, 이용된 콘크리트의 압축강도는 23.5MPa, 철근의 항복강도가 392MPa이며, 철근 직경은 기둥에 대해서 D25, 보에 D22를 사용하였다. 기둥 해의 분류는 동일하고 보의 경우 인용 문헌에서는 중앙부와 단부의 구분없이 동일한 단면

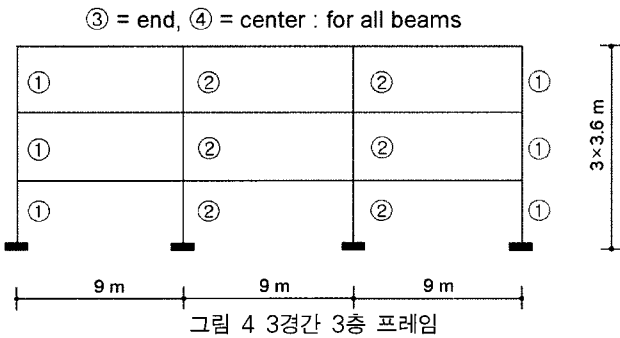
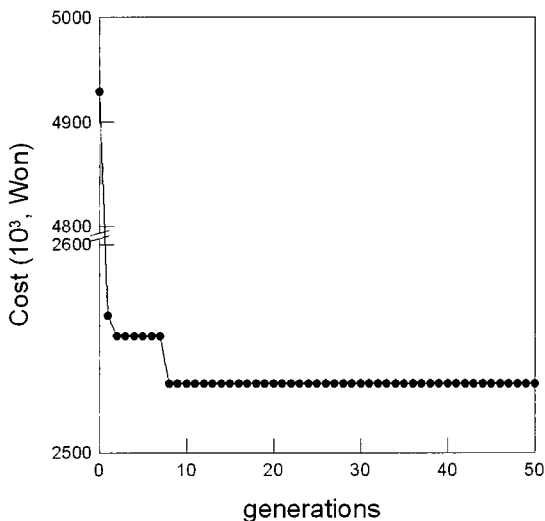
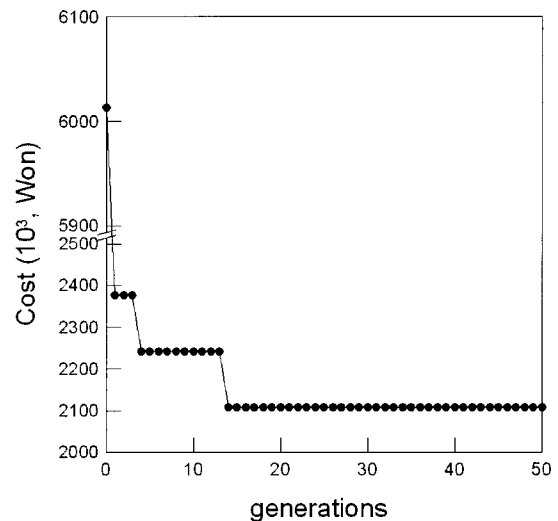


그림 4 3경간 3층 프레임



(a) 선형해석에 의한 최적설계



(b) 비선형해석에 의한 최적설계

그림 5 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 3경간 3층 프레임 최적설계

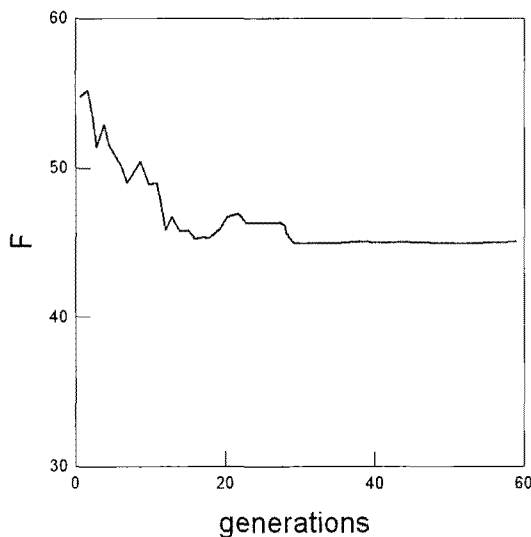


그림 6 Lee와 Ahn의 유전자 알고리즘에 의한 3경간 3층 프레임 최적설계 (Lee 등, 2003)

으로 설계를 수행한 반면 이 논문에서는 철근 배근을 달리하여 설계한 점에 차이가 있다.

먼저 단면 데이터베이스와 유전자 알고리즘에 의한 최적설계 결과를 나타낸 그림 5에서 각 세대별로 그 세대까지의 누적된 최적설계 결과 중 최소 가격에 대한 해를 나타내었다. 대상 구조물의 규모가 작고 하중 조건이 단순하여 검색 대상 해의 개수가 적고, 임의 선택된 초기 단면에 대한 해석 결과를 이용하여 회귀분석과 직접탐색을 통해 1차 연속해 및 최종 불연속해를 찾게 되므로 그림 6에 나타낸 Lee와 Ahn의 벌칙 함수와 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계시의 수렴 양상(Lee 등, 2003)에 비해 매우 빠르게 수렴함을 확인할 수 있다. 그림 6에서 F는 벌칙 함수를 이용하여 산정한 적합도 함수 값을 나타내고, 세대수가 대략 30에 이르러 최종해에 접근하는 양상을 보인다.

특히 이 논문에서 제시하고 있는 유전자 알고리즘을 적용함에 있어 선형해석을 수행한 경우 구조계 전체의 비용이 1744천원에서 수렴하는 반면 비선형해석의 경우는 1626천원으로 선형해석에 비하여 7.3% 정도 경제적인 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 또한 최종해에 대한 설계 단면 정보는

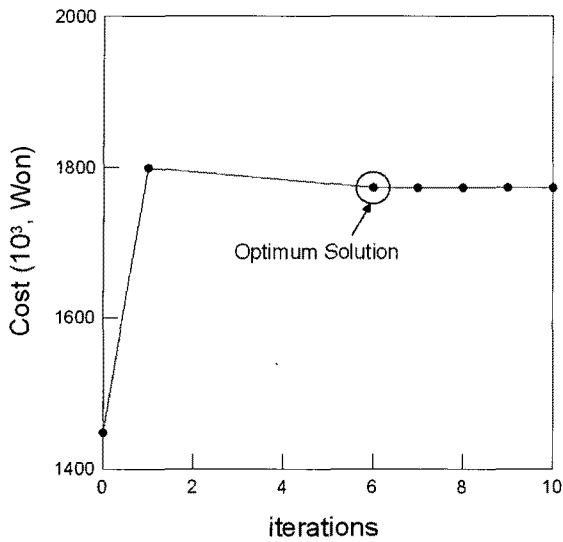
표 2에 나타내었으며, 비선형해석시 단부와 중앙부가 유사한 부재력 범위로 부재력이 도출되어 동일한 설계 단면으로 최종해가 결정되고, 단부의 휨모멘트가 중앙부로 재분배되면서 보 단면이 선형해석에 비해 상대적으로 작게 선정되는 한편 보 단부와 연결된 기둥 부재에 발생하는 휨모멘트가 감소하여 기둥 또한 작은 단면으로 선정됨으로서 결과적으로 경제적인 해를 도출하였음을 알 수 있다.

표 2에서 Lee와 Ahn이 수행한 유전자 알고리즘만을 이용한 선형해석 조건의 최적설계 결과와 비교해 보면, 이 논문의 경우 기둥 부재는 상대적으로 더 크게, 기둥에 비해 부재 길이가 더 길어 전체 구조 가격에 보다 큰 영향을 미치는 보 단면은 작게 설계되어 결과적으로 더 경제적인 설계 결과를 보이고 있다. 표에서 B와 H는 각각 단면의 폭(가로)과 높이(세로)를, 배근 정보에서 BS/HS/CS는 기둥 단면의 가로변, 세로변, 모서리부에 위치한 철근 개수를, TS/CS는 보의 인장철근과 압축철근의 개수를 나타낸다. 인용된 연구에서의 최종 설계 가격은 2070천원으로 단면 데이터베이스와 유전자 알고리즘을 도입한 본 연구에서의 1744천원에 비해 19% 정도 더 높다. 이는 보에서 단부와 중앙부를 구분하지 않고, 벌칙 함수를 도입하여 제한 조건을 만족시키는 과정에서 실제 발생 부재력에 가장 근접하는 저항 강도의 설계 단면이 아닌, 하중 조건을 만족하는 가정 단면이 그대로 설계 결과로 채택되어 적합도가 평가면서 최적해 검색의 효율이 저하된 결과로 판단된다.

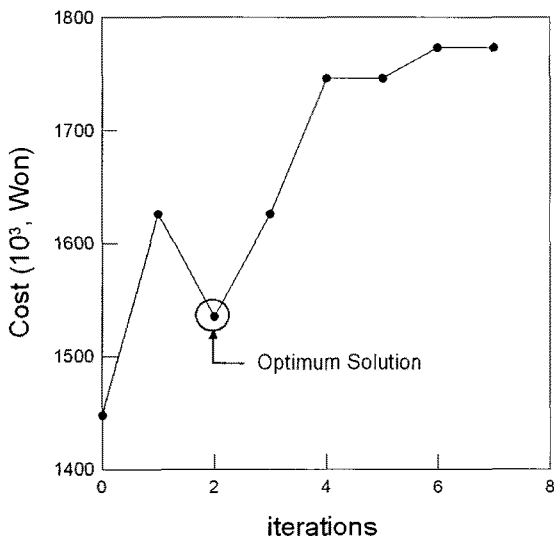
한편 유전자 알고리즘을 도입하지 않고 직접탐색과 회귀분석에 의해서만 최적해를 수행한 경우 산출한 가격 최적화 결과는 그림 7과 같다. 기둥과 보 모두 단면 번호 1에 해당하는 가장 작은 단면으로 가정하였다. 그 결과 모든 데이터베이스 내에서도 가장 적은 가격에 해당하는 초기 가정 해로부터 반복 설계가 수행됨으로 인해 실제 해석 결과에 부합하는 설계 결과를 도출하는 과정에서 전반적으로 반복 횟수가 증가함에 따라 가격 또한 증가하는 양상을 보인다. 또한, 최종 최적설계 반복 과정에서 선형해석의 경우 휨강성(EI_m)의 차이에 의해 부재력이 분포되므로 대상 구조물과 같이 단순한

표 2 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 3경간 3층 프레임 최적설계

부재	해 번호	선형해석						비선형해석					
		제안 방법			기존 연구(Lee 등, 2003)								
		B(mm)	H(mm)	배근 정보	B(mm)	H(mm)	배근 정보	B(mm)	H(mm)	배근 정보			
기둥	①	300	350	BS/HS/CS	2/0/4	300	300	철근 개수	6	300	300	BS/HS/CS	1/0/4
	②	300	300		0/0/4	300	300		4	300	300		0/0/4
보	③	200	500	TS/CS	4/3	300	550	TS/CS	5/3	200	450	TS/CS	4/2
	④	200	500		3/2	300	550		5/3	200	450		4/2



(a) 선형해석에 의한 최적설계



(b) 비선형해석에 의한 최적설계

그림 7 회귀분석과 직접탐색에 의한 3경간 3층 프레임 최적설계

프레임에서는 해석 및 설계 결과가 바로 수렴해 나가는 반면, 비선형해석시 강성에 따른 차이보다는 각 부재가 부담 가능한 저항 능력에 따라 부재력의 분포 양상이 결정되므로 해석 결과 부재력보다 강도 감소 계수를 적용하여 여유 있는 설계 단면을 적용한 후 다시 그 단면을 해석에 이용하고, 큰 가정 단면에 따라 다시 보다 큰 설계 단면으로 최적설계를 수행하는 과정이 반복되면서 주어진 하중 조건에 따라 어느 정도 부재력 분포가 안정되는 방향으로 수렴하기까지 가격이 대체로 증가해 나가는 것을 알 수 있다. 따라서 여러 해 그룹 중 최소 가격을 도출하는 해를 최종해로 선정하는 것이 가장 적절함을 알 수 있다.

그림 7에서 선형해석시 회귀분석과 직접탐색을 이용한 반복설계를 수행하여 결정된 가격이 1773천원, 비선형해석시 가격이 1626천원으로 비선형해석을 도입할 경우 8.3% 더

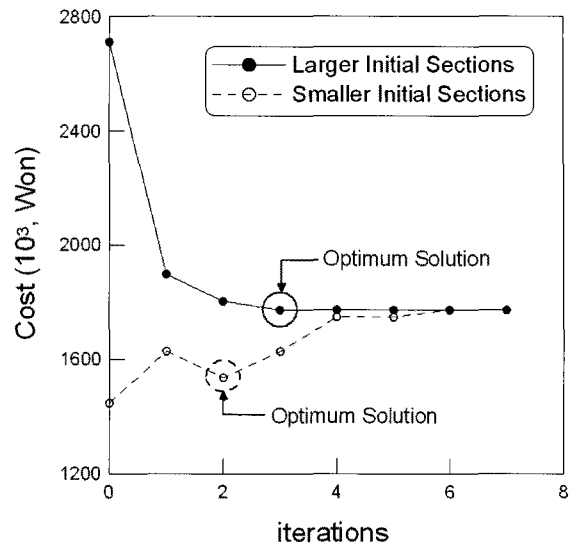


그림 8 초기 단면 가정에 따른 3경간 3층 프레임 최적설계 설계 결과 (비선형해석)

경제적임을 확인할 수 있다.

유전자 알고리즘을 적용하지 않을 경우 특히 비선형해석에 의한 최적설계 수행시 최종 설계 결과가 초기 가정 단면에 따른 부재력 분포 양상에 따라 다소 차이가 발생하게 되며, 상대적으로 큰 초기 가정 단면을 적용한 경우와 이 논문에서와 같이 가장 작은 단면으로 가정한 경우에 대해 각각 최적설계를 수행한 결과 그림 8에서와 같이 각각 1773천원과 1626천원으로 상당한 차이를 보임을 확인할 수 있다. 따라서 최소 가정 단면에 따른 설계 결과와 유전자 알고리즘을 도입한 경우 도출되는 설계 결과를 비교함으로써 최종해의 전역 최적해 여부를 보다 효과적으로 판단할 수 있으며, 그 비교 결과 유전자 알고리즘을 도입함으로써 보다 개선된 설계 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, 그림 8에서 비선형해석을 수행하고 결과 부재력에 대해 설계 기준상의 안전율이 적용된 설계 단면을 선택한 후 다시 다음 단계의 해석 및 설계를 반복함에 따라, 점차 저항 강도가 큰 설계 단면으로 수렴하는 양상을 보이게 되어 부재력의 재분배가 이루어지지 않는 선형해석 기반 설계와 동일한 결과로 수렴함을 알 수 있다. 즉, 비선형해석의 특징인 재분배된 부재력 조건이 설계에 반영되는 초기 반복 단계에서 최적해가 검색되며, 반복 횟수가 증가할수록 초기 가정 단면 조건이나 선형 및 비선형해석 여부에 관계없이 유사한 해를 검색하게 된다.

표 3에 최종 설계 결과를 나타내었으며, 유전자 알고리즘을 적용하는 경우가 선형해석시 1.6% 더 경제적인 해를, 비선형해석시는 동일한 결과로 확인되었다. 이는 초기 가정된 단면에 따라 해석 및 설계 결과가 영향을 받게 되므로 다양한 임의 단면에 대한 시험을 거쳐 해를 도출하는 유전자 알고리즘이 전역 최적화에 보다 적합함을 보여주는 것으로, 비

표 3 회귀분석과 직접탐색에 의한 3경간 3층 프레임 최적설계

부재	해 번호	선형해석			비선형해석				
		B(mm)	H(mm)	배근 정보	B(mm)	H(mm)	배근 정보		
기둥	①	300	350	BS/HS/CS	2/4/4	300	300	BS/HS/CS	1/0/4
	②	300	300		0/0/4	300	300	BS/HS/CS	0/0/4
보	③	250	450	TS/CS	5/2	200	450	TS/CS	4/2
	④	250	450		3/2	200	450		4/2

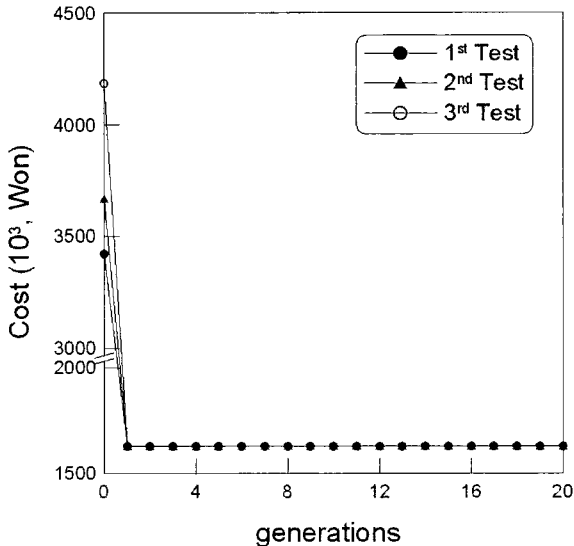


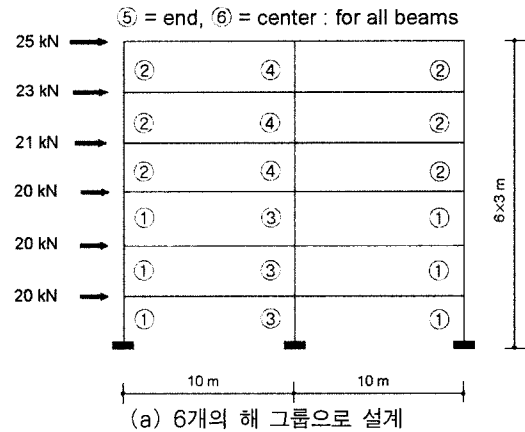
그림 9 유전자 알고리즘을 도입한 3경간 3층 프레임 반복 최적설계 결과 비교(비선형해석)

선형해석시는 단순한 구조계인 본 예제의 특성과 최소한의 단면 가정시 붕괴(collapse)에만 이르지 않는다면 부재력이 최대 효율로 분포하여 가장 경제적인 결과를 나타낸다는 비선형해석에 의한 설계 특성상 발생하는 현상이다. 따라서 보다 복잡하고 규모가 큰 구조계 및 하중 조건에 대해서는 비선형해석시에도 설계 결과가 차이를 보일 가능성이 커질 것으로 예견된다.

또한, 동일 구조물을 대상으로 유전자 알고리즘을 도입한 최적설계를 여러 번 수행하고 그 결과를 비교함으로써 임의로 생성되는 어떠한 초기 가정 단면 조건에 대해서도 여러 세대를 반복함에 따라 동일한 전역 최적해를 최종해로 선택 가능함을 비선형해석을 수행하는 경우에 대해 그림 9에서 보였다.

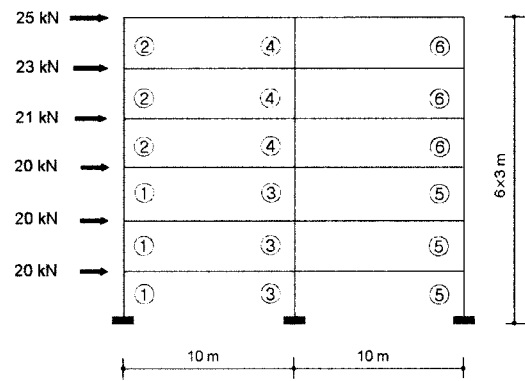
5.2 수직하중 및 횡하중이 작용하는 2경간 6층 프레임

3.5kN/m²의 고정하중 및 2.5kN/m²의 활하중에 대한 수직하중과 그림 10과 같은 횡하중이 함께 작용하는 경우에는 기둥 부재력이 위치에 따라 차이를 보일 뿐 아니라 보 또한 횡하중에 의해 추가로 발생하는 휨모멘트에 의해 층별로 차이가 발생할 것을 예상할 수 있다. 따라서 이러한 차이를 모



(a) 6개의 해 그룹으로 설계

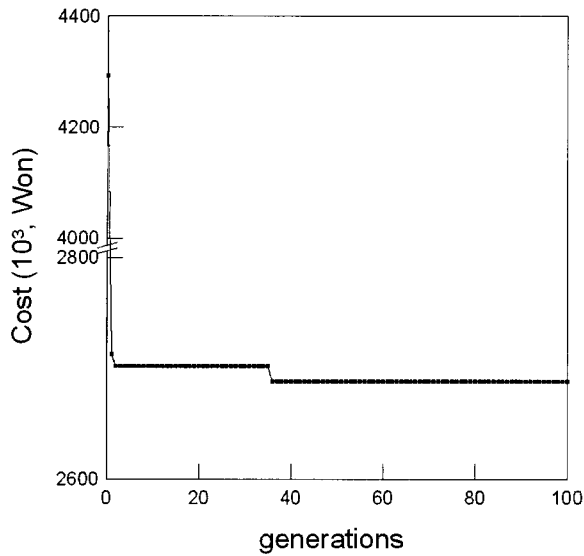
Beam FL.	end	center
1 ~ 3F	⑦	⑧
4 ~ 6F	⑨	⑩



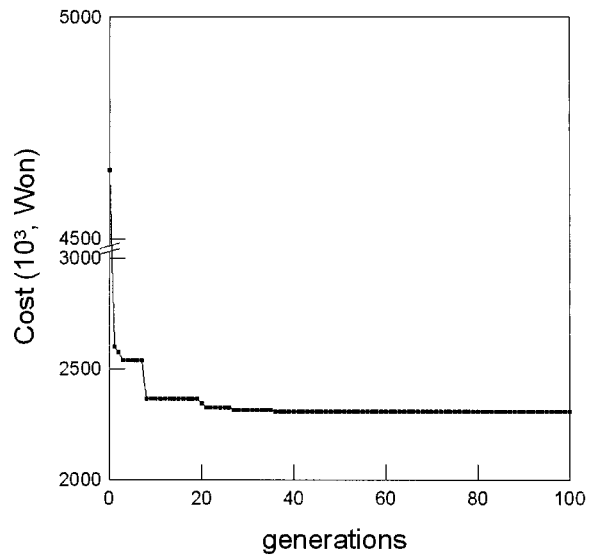
(b) 10개의 해 그룹으로 설계
그림 10 2경간 6층 프레임 개요

두 고려하여 해를 지나치게 세분화할 경우 유전자 알고리즘처럼 임의로 해를 선택하고 세대 수를 반복하면서 점차적으로 선정된 해의 적합도(Fitness)를 개선시키는 방식에서는 해의 개수가 많아짐으로 인해 수렴 속도가 떨어지게 되어 오히려 적합도가 저하된 해를 얻게 될 수 있다. 이를 그림 10과 같이 해의 그룹 수를 달리 설정한 후 각각의 최적설계 결과를 다음과 같이 나타내어 비교하였다.

유전자 알고리즘에 의한 설계의 경우 선형과 비선형해석 모두 40회에 가까운 반복을 통해 수렴해를 얻었다. 특히 휨 강성이 아닌 매 반복 과정마다 달리 적용되는 가정 단면의



(a) 선형해석에 의한 최적설계



(b) 비선형해석에 의한 최적설계

그림 11 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(6개 해, 수직+횡하중)

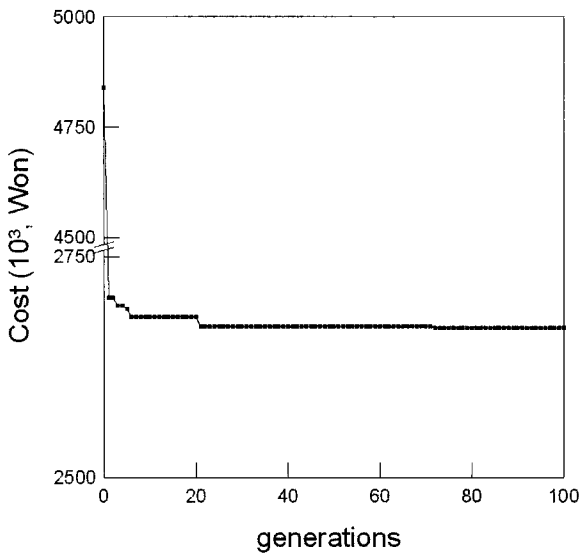
표 4 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(6개 해, 수직+횡하중)

부재	해 번호	선형해석			비선형해석				
		B(mm)	H(mm)	배근 정보	B(mm)	H(mm)	배근 정보		
기둥	①	300	450	BS/HS/CS	2/6/4	300	350	BS/HS/CS	2/4/4
	②	300	400		1/3/4	300	350		2/1/4
	③	450	600		6/7/4	550	750		7/12/4
	④	300	300		2/2/4	350	500		4/6/4
보	⑤	250	450	TS/CS	5/3	200	350	TS/CS	3/3
	⑥	250	450		4/2	200	350		3/3

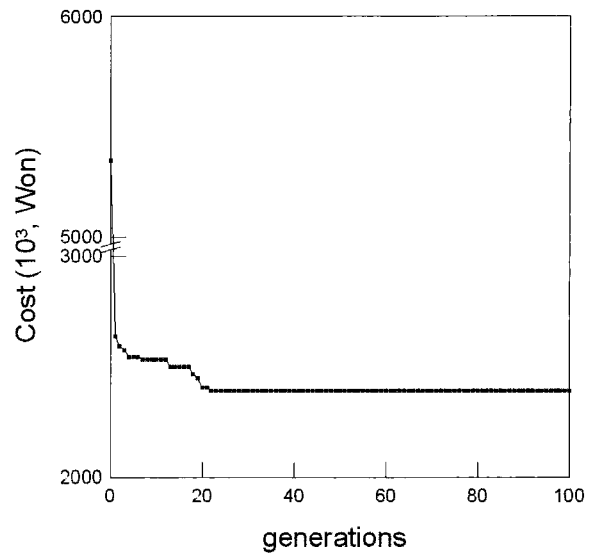
저항 능력에 따라 부재력이 새로운 양상으로 분포하여 설계되는 비선형해석시엔 수렴시까지 해가 꾸준히 변화하고 있어 수행시 지정하는 세대 수를 100으로 증가시켜 최적설계를 수행하였다. 최종 구조물의 가격은 선형해석시 2689천원, 비선형해석시 2308천원으로 비선형해석을 통해 16.5%의 비용을 절감할 수 있으며, 수직하중만 작용하는 경우와 비교할 때 하중 조건이 복잡해지면서 상대적으로 더 경제적인 최적해를 도출하고 있음을 알 수 있다.

다음은 보다 해를 세분화하여 6개의 기둥과 4개의 보 단면에 대해서 총 10개의 해로 최적설계를 수행한 결과를 나타내었다. 보다 세분화된 부재 설계에 경제성 증대를 예상하였으나, 선형해석시 2669천원, 비선형해석시 2392천원으로 수렴함으로써 선형해석시엔 예상과 부합하여 경제성이 증대된 반면 비선형해석시엔 오히려 더 높은 가격으로 수렴하였다. 선형해석의 경우 부재간의 강성비에 의해 부재력을 분포시키는 한편 모멘트 재분배가 없이 각 부재가 무한대의 하중 저항 능력을 가진다고 가정하므로 수평 부재인 보와 수직 부재인

기둥에 대해 각각 하중이 직접 작용하는 해당 부재 내에서 모든 하중을 부담하게 되고, 따라서 가정 단면이 달라지더라도 부재력 분포 양상에 큰 차이가 없어 회귀분석과 직접탐색을 통해 최적해에 빠르게 수렴함으로써 인해 예상대로 부재를 좀 더 세분화할 경우 세분화된 최적설계를 통해 경제적인 해에 도달한다. 반면, 비선형해석시엔 보에서 수직하중을 모두 부담하지 못하는 경우 인접 기둥 부재로 초과되는 휨모멘트를 분포시키는 등 가정 단면의 조합에 따라 다양한 설계 조건이 형성될 수 있어 가정 단면의 선택이 그로 인해 도출되는 해에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 6개의 해에서 10개의 해로 해의 개수가 증가한 경우 각각의 설계 단면에 대해 전역 최적해를 도출 가능한 가정 단면을 임의로 선택하기에는 확률적인 측면에서 불리한 것으로 판단된다. 즉, 6개의 해에서와 동일한 수준의 최적해에 도달하기 위해서는 세대 수를 증가시켜야 가능할 것으로 예상되며, 이 세대 수 또한 그림 12(b)에서의 수렴 양상에서 추측하더라도 매우 큰 수로 설정해 주어야 할 것으로 판단되고, 또한 선형해석의 경우도 해가



(a) 선형해석에 의한 최적설계

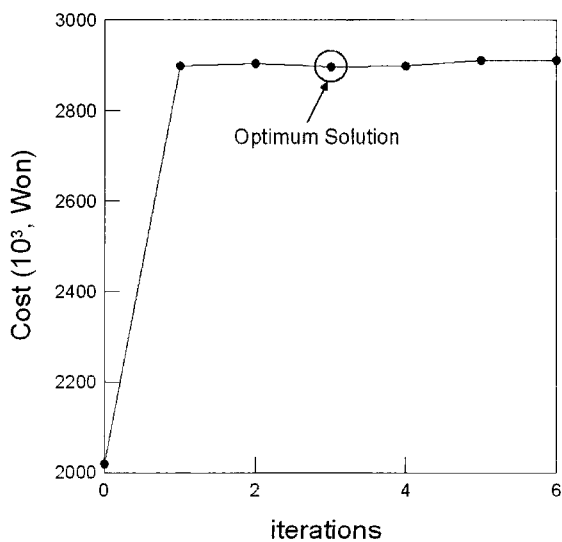


(b) 비선형해석에 의한 최적설계

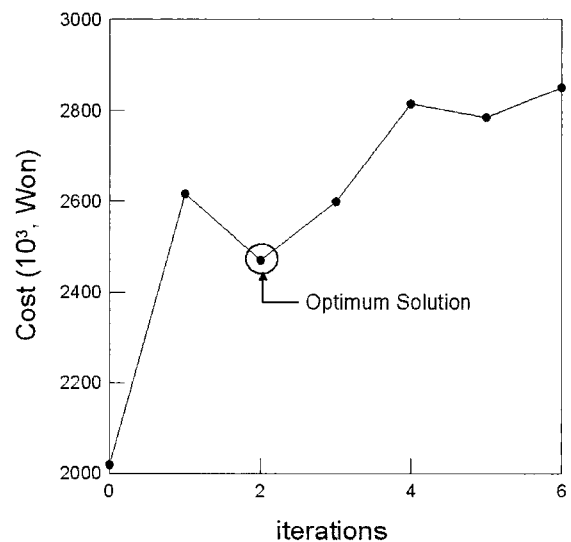
그림 12 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(10개 해, 수직+횡하중)

표 5 단면 DB와 유전자 알고리즘에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(10개 해, 수직+횡하중)

부재	해 번호	선형해석			비선형해석				
		B (mm)	H (mm)	배근 정보	B (mm)	H (mm)	배근 정보		
기둥	①	300	450	BS/HS/CS	2/5/4	350	450	BS/HS/CS	4/6/4
	②	300	350		2/3/4	300	350		2/1/4
	③	450	650		6/10/4	450	650		5/10/4
	④	300	300		2/2/4	300	300		2/2/4
	⑤	300	450		1/6/4	300	450		2/5/4
	⑥	300	400		2/1/4	300	400		2/1/4
보	⑦	200	500	TS/CS	4/3	200	350	TS/CS	3/3
	⑧	200	500		3/2	200	350		3/3
	⑨	250	450		5/3	200	450		4/2
	⑩	250	450		4/2	200	450		4/2



(a) 선형해석에 의한 최적설계

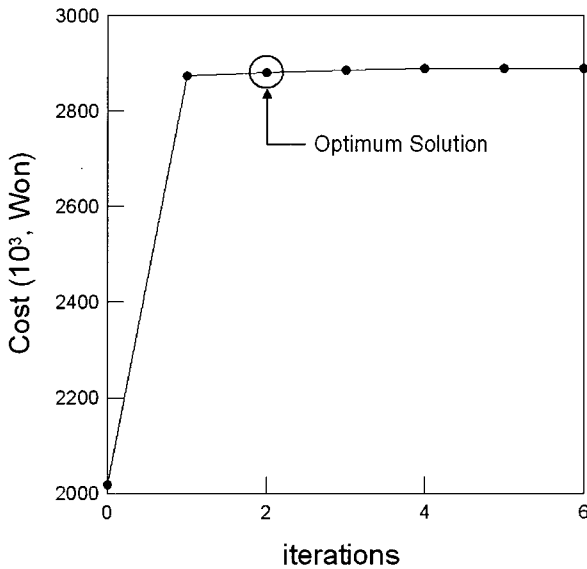


(b) 비선형해석에 의한 최적설계

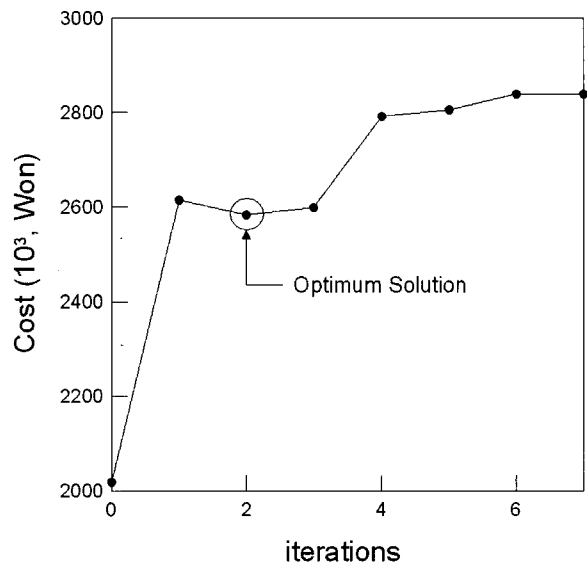
그림 13 회귀분석과 직접탐색에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(6개 해, 수직+횡하중)

표 6 회귀분석과 직접탐색에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(6개 해, 수직+횡하중)

부재	해 번호	선형해석			비선형해석				
		B (mm)	H (mm)	배근 정보	B (mm)	H (mm)	배근 정보		
기둥	①	300	450	BS/HS/CS	2/5/4	300	450	BS/HS/CS	2/6/4
	②	300	450		2/1/4	300	350		2/4/4
	③	500	700		5/5/4	500	750		6/12/4
	④	300	300		2/2/4	350	500		4/4/4
보	⑤	250	500	TS/CS	5/2	200	400	TS/CS	3/2
	⑥	250	500		3/2	200	400		3/2



(a) 선형해석에 의한 최적설계



(b) 비선형해석에 의한 최적설계

그림 14 회귀분석과 직접탐색에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(10개 해, 수직+횡하중)

6개인 경우에 비해 비용 절감 효과가 0.7% 정도로 매우 적어 그룹을 지나치게 세분화할 경우 유전자 알고리즘에서는 오히려 효율이 떨어진다고 할 수 있다.

그림 13에서 회귀분석과 직접탐색에 의해서만 최적설계를 수행한 결과를 보이고 있으며, 선형해석시 2897천원, 비선형해석시 2471천원으로 비선형해석에 따른 설계를 통해 14.7%의 비용을 절감하였다. 유전자 알고리즘을 적용하여 다양한 가정 단면에 대한 시험을 수행했을 때 선형 및 비선형해석시 각각 7.2%, 6.6% 더 경제적인 결과를 주어 전역 최적해를 도출하고 있음을 알 수 있다. 표 6에 설계 단면 및 배근 정보를 나타내었다.

마지막으로 회귀분석과 직접탐색만을 적용하여 10개의 해에 대한 최적설계를 수행하였으며, 선형 및 비선형해석의 각 경우에 대해 2881천원과 2599천원의 가격으로 산정되었다.

6개의 해에 대한 최적설계 결과에 비해서는 선형해석시 0.6%의 비용 절감 효과를 나타내었고, 비선형해석의 경우 오히려 5.2% 더 비용이 증가된 결과를 보이고 있다. 개별

부재에 대한 설계로 인해 경제성이 높아질 것이라는 예측에 부합한 선형해석의 경우와는 달리 비선형해석의 경우 해가 6개인 경우는 기둥을 4개 그룹으로 분류함에 따라 대체로 실제 발생 부재력보다 여유있는 단면으로 설계되고, 반복 해석 및 설계 과정에서 기둥이 보에 비해 상대적으로 많은 부재력을 부담하게 되어 보는 보다 작은 단면으로 설계되면서 경제적인 결과를 도출한 것으로 판단되는 반면, 해가 10개인 경우 특히 세분화된 그룹을 가지는 기둥에 대해 각각 발생 부재력에 부합하는 단면으로 해가 선택되어 하중 저항 능력에 여유가 없으므로 상대적으로 해가 6개인 경우에 비해 보다 부담해야 하는 부재력 비율이 높아져서, 기둥보다 부재 길이가 길어 전체 가격에 큰 영향을 미치는 보 단면이 커져 경제성에서 불리한 결과를 도출한 것으로 보인다.

초기 단면 가정 과정에 유전자 알고리즘을 적용하면 선형해석과 비선형해석 수행시 각각 7.4% 및 8%의 비용 절감 효과를 얻을 수 있다. 각각의 상세한 설계 정보는 표 7에 나타내었다.

표 7 회귀분석과 직접탐색에 의한 2경간 6층 프레임 최적설계(10개 해, 수직+횡하중)

부재	해 번호	선형해석			비선형해석				
		B (mm)	H (mm)	배근 정보	B (mm)	H (mm)	배근 정보		
기둥	①	300	450	BS/HS/CS	1/6/4	300	400	BS/HS/CS	2/4/4
	②	300	400		1/3/4	300	350		2/4/4
	③	450	650		6/6/4	550	750		8/12/4
	④	300	350		1/3/4	350	500		4/5/4
	⑤	350	450		4/5/4	300	400		1/4/4
	⑥	300	450		1/2/4	300	350		2/4/4
보	⑦	250	500	TS/CS	5/2	200	450	TS/CS	4/2
	⑧	250	500		3/2	200	450		4/2
	⑨	250	500		5/2	200	450		4/2
	⑩	250	500		3/2	200	450		4/2

6. 결 론

보다 경제적인 설계를 위한 최적설계시 비선형해석 결과를 이용할 경우 부재력의 분포가 단면 저항 능력에 따라 분포하게 되므로 가정 단면의 조합에 따라 해석 결과 및 그에 따른 설계 결과가 상당히 다른 양상을 보이게 된다. 따라서 사용자가 임의로 가정한 초기 단면으로부터 도출된 최종해가 전역 최적해인지 국부 최적해(local minimum)인지의 여부를 검토하여야 한다. 이와 같은 작업을 위해서 다양한 초기 가정 단면의 조합을 생성하고 이에 따라 발생한 설계 부재력 조건에 따른 최적설계 결과를 비교하기 위하여 유전자 알고리즘을 도입하였다. 유전자 알고리즘에 의해 시험 해석 및 설계를 반복할수록 보다 나은 결과를 도출하는 가정 단면의 조합으로 시험 단면의 적합도를 향상시킴으로써 최종적으로 전역 최적해에 도달하였으며, 그 결과를 유전자 알고리즘을 적용하지 않은 경우와 비교·검토하고 선형 및 비선형해석 수행시에 대해 각각 그 결과를 나타내었다.

이 논문에서와 같이 유전자 알고리즘에 의해 초기 단면만을 가정한 후 해를 검색하는 과정에서는 회귀분석과 직접탐색을 이용하게 되면 일반적인 유전자 알고리즘만을 이용하여 최적설계를 수행할 경우에 비해 매우 빠른 수렴 속도와 함께 얻어진 해의 경제성 면에서도 개선된 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, 시공상의 편의를 배제하고 경제성만을 고려할 때 일반적으로 하중 조건이나 각 부재의 위치별로 달라지는 부재력에 따라 세분화된 설계 단면을 적용하는 것이 보다 나은 결과를 보이게 되지만, 유전자 알고리즘을 도입하는 경우 임의성에 의해 해(여기서는 가정 단면)를 선택하게 되므로 설계 대상 단면을 세분화하여 검색 대상 해의 개수가 많아질 경우 보다 단순하게 부재를 그룹화함으로써 해의 개

수를 줄인 경우에 비해 오히려 수렴성과 경제성이 떨어지는 결과를 보이고 있다. 즉, 수렴성 및 결과적인 해의 경제성 향상을 위해서는 적절한 해의 개수를 설정하는 것이 중요한 인자로 작용함을 확인할 수 있었으며, 구조계의 규모나 하중 조건에 따라 최적의 결과를 도출하기 위해 요구되는 그룹화 방법과 이에 따른 해의 개수 결정 기준은 향후 보다 다양한 예제를 도입하고 이에 대한 시험 및 연구를 수행함으로써 세워질 수 있을 것이다.

제안된 최적설계 알고리즘은 목적함수와 제약조건을 구성에 있어 복잡하거나 어려운 과정이 수반되지 않으며, 선택된 해는 설계 기준과 실무상의 제한 조건을 만족하고 있어 별도의 검토가 요구되지 않는 장점이 있다. 또한 유전자 알고리즘을 도입함으로써 전역 최적해를 최종해로 선택 가능하도록 하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심 기술 CO₂)과 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

곽효경, 김지은 (2007) 데이터베이스에 기반한 RC 평면 프레임 구조물의 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 20(2), pp.165~179.
 김남희, 장승필, 이승철 (2001) 다단계 신경망을 이용한 초기 구조설계 시스템 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 15(2),

- pp.261~270.
- 양영순, 김기화** (1995) 실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계, 한국전산구조공학회 논문집, 8(2), pp.123~132.
- 문병로** (2003), 유전알고리즘, 두양사.
- 한국콘크리트학회 · 대한건축학회** (1999) 콘크리트구조설계 기준, 건설교통부.
- 한국엔지니어링진흥협회** (2004) 철근콘크리트 구조물의 한계 상태 설계법, 과학기술부.
- Andre, J., Siarry, P., Dognon, T.** (2001) An improvement of the standard genetic algorithm fighting premature convergence in continuous optimization. *Advances in Engineering Software*, 32, pp. 49~60.
- Belegundu, A.D., Chandrupatla, T.R.** (1999) *Optimization Concepts and Applications in Engineering*, Prentice Hall.
- Beyer, H.G.** (2001) *The Theory of Evolution Strategies*, Springer.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON** (1990) CEB-FIP MODEL CODE 1990. Thomas Telford.
- The European Standard EN 1992-1-1** (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. BSI British Standards.
- Camp, C.V., Pezeshk, S., Hansson, H.** (2002) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(1), pp.105~115.
- Chau, K.W., Albermani, F., Hendtlass, T., Ali, M.** (2002) *Genetic Algorithms for Design of Liquid Retaining Structures*, IEA/AIE 2002, LNAI 2385, pp.119~128, Springer.
- Deb, K.** (2000) An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 186, pp. 311~338.
- Ferreira, C.C., Barros, M.H.F.M., Barros, A.F.M.** (2003) Optimal Design of Reinforced Concrete T-Sections in Bending, *Engineering Structures*, 25(7), pp.951~964.
- Govindaraj, V., Ramasmy, J.V.** (2005) Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Continuous Beams Using Genetic Algorithms, *Computers and Structures*, 84(1), pp.34~48.
- Holland, J.H.** (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, Michigan, The University of Michigan Press.
- Hrstka, O., Kucerova, A., Leps, M., Zeman, J.** (2003) A competitive comparison of different types of evolutionary algorithms. *Computers and Structures*, 81, pp.1979~1990.
- Lee, C., Ahn, J.** (2003) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(6), pp.762~774.
- Michalewicz, Z.** (1999) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3rd Revised and Extended Edition*, Springer.
- Nilson, A.H., Darwin, D., Dolan, C. W.** (2003) *Design of Concrete Structures*, Mc Graw Hill.
- Sahab, M.G., Ashour, A.F., Toropov, V.V.** (2005) A Hybrid Genetic Algorithm for Reinforced Concrete Flat Slab Buildings. *Computers and Structures*, 83, pp.551~559.
- Salajegheh, E., Gholizadeh, S.** (2005) Optimum Design of Structures by an Improved Genetic Algorithm Using Neural Networks. *Advances in Engineering Software*, 36, pp.757~767.
- Srinivas, V., Ramanjaneyulu, K.** (2006) An integrated approach for optimum design of bridge decks using genetic algorithms and artificial neural networks. *Advances in Engineering Software*, 38 (7), pp.475~487.
- Yang, Z., Huang, C., Qu, J., Wang, Y.J., Guo, C.** (2004) Inversing Reinforced Concrete Beams Flexural Load Rating Using ANN and GA Hybrid Algorithm. ISSN 2004, LNCS 3174, pp.779~785, Springer.