

변수분리의 원리에 의한 철근콘크리트 평면 뼈대 구조물의 최적화

Optimization of RC Plane Frames Based on The Principle of Divided Parameters



정영식*

(Chung, Young Shik



김봉익*

Kim, Bong Ick

요 약

본 연구에서는 사각형단면을 가진 철근콘크리트구조물의 한 최적설계방법을 제시하고자 한다. 철근콘크리트는 한 단면이 2가지의 재료로 구성되어 있으므로 이로인해 야기될 수 있는 어려움을 해소하기 위해 변수분리의 원리를 도입하였다. 이 원리에 사용된 설계변수 및 제약조건은 외부 및 내부의 두 그룹으로 분류하고, 최적화과정도 외부 및 내부로 나누어진다.

최적화기법에는 Pattern Search을 수정한 Modified Pattern Search방법을 제시하며, 이의 정확도를 여러 가지의 다른 최적화기법들과 서로 비교함으로써 이 방법의 우수성을 입증하였다. 이 방법으로부터 얻어지는 모든 설계는 하나의 최적설계이며 ACI 318-89의 규정을 모두 만족하는 설계이다.

Abstract

This work presents a method of optimum design for reinforced concrete building frames with rectangular cross sections. To overcome difficulties arising from the presence of two

* 정회원, 울산대학교 토목공학과 교수

** 경상대학교 해양토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 4월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

materials in one element(concrete and steel), the principle of divided parameters is adopted. The design variable parameters are divided into two groups - external and internal. The optimization is also divided into external and internal procedure.

Several search algorithms are tested to verify their accuracy for the external optimization. This work proposes a new search method, a modified pattern search, and sample problems prove its accuracy and usefulness. The design obtained by this method is an optimum and in full accord with ACI Building Code Requirements(ACI 318-89).

Keywords : optimal design, structural optimization, reinforced concrete building frames, divided parameters, discrete variables, pattern search

1. 서 론

최적설계란 주어진 제약조건을 만족시키면서 목적함수의 값이 최대 또는 최소가 되도록 설계변수의 값을 결정하는 과정이라 할 수 있다. 구조물 최적설계의 목적함수는 건설비용이나 구조물의 중량 등이 되며, 제약조건으로는 변위제약과 응력제약 등을 생각할 수 있다. 철근콘크리트구조물의 최적설계에서는 콘크리트강도, 구조물의 형상, 콘크리트단면의 치수, 콘크리트단면내의 철근량등이 목적함수에 변화를 주는 양으로 이러한 것들이 설계변수로 취급된다.

일반적으로 철근콘크리트구조물을 설계할 경우 설계자의 경험을 통해서 콘크리트강도 및 철근량들은 미리 규격화된 값(이산자료)중에서 선택되고 있으며, 콘크리트단면은 규격화된 값은 아니지만 통상 사용하고 있는 단면을 선택하여 설계하고 있다. 이러한 이산최적화에 관한 연구로는 Cella¹⁾ 등의 Combinatorial Algorithm에 의한 방법, Reinschmidt²⁾ 등의 묵시적 열거법(Implicit Enumeration)을 이용한 최적화방법이 있고, Lai³⁾는 Hooke and Jeeves의 Pattern Search 등을 확장한 최적화방법을 제시하였다. Choi⁴⁾는 단면 데이터베이스를 이용하여 연속해부근에서 직접탐색방법을 통하여 이산최적설계 값을 구하였고, Thanedar등은 Discrete Optimization에 관한 Survey Paper⁵⁾에서 분기한계알고리즘, Simulated Annealing, Genetic Algorithms 등에 의한 최적화방법을 소개하였다.

본 연구에서는 이산형자료에 의한 사각형단면을

가진 철근콘크리트 뼈대구조물의 최적화방법을 제시하고자 한다. 철근콘크리트구조에서는 한 단면이 두 가지의 재료(콘크리트, 철근)로 구성됨으로 인한 어려움이 제기될 수 있다. 변수분리의 원리⁶⁾를 적용함으로써 이러한 어려움을 극복하고자 하였다.

철근콘크리트구조물의 최적설계에 사용된 이 원리는 모든 설계변수를 외부설계변수와 내부설계변수로 분리하고 제약조건도 외부와 내부제약조건으로 분리하여 외부최적화를 수행하면서 여러차례의 내부최적화가 수행되도록 하는 방법이다.

최적설계 자료는 설계자가 실제로 사용할 수 있는 이산형자료로 한다. 본 연구에서는 외부최적화 과정에서 Pattern Search를 수정한 Modified Pattern Search방법을 시도하였으며, 예를 통하여 이 방법의 우수성을 입증하였다. 본 연구의 결과 얻어진 최적설계방법은 ACI Code(ACI 318-89)를 만족하면서 그 비용이 최소가 되는 설계를 제공하며 이용자의 요구에 따라 여러 가지 대안설계도 제공될 수 있다.

2. 설계변수의 분리

일반적으로 최적화문제는 목적함수(식 1)와 제약조건(식 2)으로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } Y(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

subject to

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, i = 1, \dots, L \quad (2)$$

철근콘크리트는 한 단면이 2가지의 재료로 구성되므로 이로 인한 설계과정의 복잡성을 피하기 위하여 변수분리의 원리를 사용하며, 이 원리는 일반최적화 문제인 (식 1)의 m 개의 설계변수 (x_1, x_2, \dots, x_m) 를 n 개의 외부설계변수 (x_1, x_2, \dots, x_n) 와 $m-n$ 개의 내부설계변수 (x_1, x_2, \dots, x_m) 의 2개의 그룹으로 나누고, 제약조건(식 2)도 외부제약조건과 내부제약조건으로 나눈다. 여기서 L 개의 제약조건식(식 2) 중에서 제약조건식 f_i 에서 f_N 까지(N 개)를 외부제약조건(식 3)으로하고, 제약조건식 f_{N+1} 부터 f_L 까지를 내부제약조건(식 4)으로 나누어 다음과 같이 표현한다.

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq 0, \quad i = N+1, \dots, L \quad (4)$$

위의 변수분리의 원리를 철근콘크리트(RC)구조물의 설계에 적용하기 위해 사용될 내·외부변수 및 내·외부제약조건을 분류하면 Table 1과 같다.

Table 1 External/ internal variables /constraints

	Design Variables	Constraints
Ext.	Strength of Concrete, Dimension of Section	Minimum Size Limits, Displacement Constraints
Int.	Areas of Re-bars	Stress Constraints

외부제약조건(식 3)은 외부설계변수 (x_1, \dots, x_m) 만을 포함하고 있으므로 내부설계변수는 외부 제약조건에 전혀 영향을 주지 못하고 있다. 예로서 철근량은 절점의 변위에 영향을 주지 않는다는 의미이며 이는 철근콘크리트 구조물 해석시 부재의 강성(EI) 산정에 철근의 영향을 고려하지 않음에 따른 것이다. 최적화 과정은 내·외부최적화 과정으로 분리되는데 내부최적화는 외부제약조건을 만족시키는 외부설계변수들의 값을 확정해 놓은 상태에서 내부제약조건을 만족하면서 목적함수가 최소가 되도록 내부설계변수의 값을 결정하는 과정이다. 이와 같이 구해진 다수의 내부최적설계 중에서 최적의 설계를 구하는 과정이 외부최적화이다.

3. 철근콘크리트구조물의 설계공간의 특성

철근콘크리트구조물의 설계공간의 특성을 파악하

기 위해 규모가 작은 문제(설계공간이 작은 문제)의 전설계공간에서 직접적인 검색을 하였다. 즉 전설계공간의 모든 가능한 외부변수의 조합에 대해 내부최적화를 실시하고 국지최적설계를 모두 찾아 내었다. 이 방법은 틀림없는 전공간최적설계(Global Optimum)를 찾을 수는 있으나 설계공간의 크기가 커지면 사실상 실행이 불가능하다.

적용된 구조는 3경간 4층과 4경간 5층 평면뼈대구조물을 예로하여 각 구조물에 대한 모든 국지최적설계(Local Minima)를 찾아내었으며 이들 각 구조물에 대하여 자세히 설명한다.

3.1 3경간 4층 평면뼈대구조물

3경간 4층 평면뼈대구조물은 16개의 기둥과 12개의 보로 전부 28개의 부재로 구성되며 경간의 길이는 6m, 각층의 높이는 4m로 하였다.

외부설계변수는 설계변수의 수를 줄이기 위해 평면뼈대구조물인 관계로 전구조의 폭을 같이 하고(Fig. 1), 각층별로 보의 높이를 같게 하면 모두 8개의 외부설계변수 (x_1, x_2, \dots, x_8) 가 되며 구체적인 내용은 Table 2와 같다.

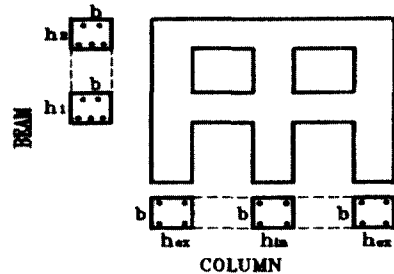


Fig. 1 External variables of beams/columns

모든 설계변수는 이산형변수(Discrete Variables)로서 각 변수가 갖는 값은 Table 3(4st)과 같다.

Table 2 Ext. Variables of 3-bay 4-story frame

Symbol	Name	Symbol	Name
x_1	Strength of Concrete: σ_c	x_1	Beam Depth of St. 1: h_1
x_2	Breadth of Members: b	x_2	Beam Depth of St. 2: h_2
x_3	Depth of Ext. Columns: h_{ex}	x_3	Beam Depth of St. 3: h_3
x_4	Depth of Int. Columns: h_{mx}	x_4	Beam Depth of St. 4: h_4

Table 3 Design data for 3-b 4-s & 4-b 5-s frames

No	① Breadth (Cm)		② Depth of exterior columns (Cm)		③ Depth of interior columns (Cm)		④ Depth of beams (Cm)		⑤ Concrete strength (Kg/cm ²)
	4st.	5st.	4st.	5st.	4st.	5st.	4st.	5st.	
	1	38.0	38.0	40.0	40.0	35.0	30.0	50.0	
2	40.0	40.0	45.0	45.0	40.0	35.0	55.0	55.0	280.0
3	42.0	42.0	50.0	50.0	45.0	40.0	60.0	60.0	350.0
4	44.0	44.0	55.0	55.0	50.0	45.0	65.0	65.0	
5		46.0		60.0		50.0	70.0	70.0	
6		48.0		65.0		55.0		75.0	
7								80.0	

* 4st. : Data for 4-story frame
 5st. : Data for 5-story frame

Table 3(4st)을 따를 경우 외부최적화에서는 총 120,000가지의 설계가 있으며 각각의 경우마다 내부 최적화 과정인 철근의 단면적의 선택이 이루어진다. 이 설계중 전설계공간검색을 통해 27개의 국지최적설계가 발견되는데 이들은 Table 4와 같다. 여기서 1개의 국지최적설계는 그 주변의 6560(3³-1)의 설계에 비해 목적함수의 값이 작은 설계를 의미하는 것이다

Table 4 Local minima of 3-bay 4-story frame

No	Design								Cost
1	1	1	1	1	3	5	4	4	2700.97
2	1	1	1	1	5	5	2	2	2739.02
3	1	1	1	1	5	5	2	4	2707.81
4	1	1	1	1	5	5	4	2	2720.14
5	1	1	1	2	3	5	2	4	2715.39
6	1	1	1	2	3	5	4	2	2734.56
7	1	1	1	2	5	5	4	4	2691.33*
8	1	2	1	1	1	1	2	2	2770.64
9	1	2	1	1	1	1	2	4	2709.19
10	1	2	1	1	1	1	4	2	2714.67
11	1	2	1	1	1	1	4	4	2716.36
12	1	2	1	1	1	1	2	2	2697.89
13	1	2	1	1	1	1	2	4	2706.44
14	1	2	1	1	1	1	4	2	2718.76
15	1	2	1	1	1	1	4	4	2713.61
16	1	2	1	1	1	1	2	2	2718.76
17	1	2	1	1	1	1	2	4	2720.46
18	1	2	1	1	1	1	4	2	2732.79
19	1	2	1	1	1	1	4	4	2727.64
20	1	2	1	1	1	1	2	2	2711.58
21	1	2	1	1	1	1	4	2	2708.83
22	1	2	1	1	1	1	4	4	2703.68
23	1	2	1	1	1	1	2	2	2715.68
24	1	2	1	1	1	1	2	2	2729.71
25	1	2	1	1	1	1	2	2	2708.83
26	1	2	1	1	1	1	2	4	2710.52
27	1	2	1	1	1	1	4	2	2722.85

* : Global Minimum

3.2 4경간 5층 평면뼈대구조물

4경간 5층 평면뼈대구조물은 25개의 기둥과 20개의 보로 총 45개의 부재로 구성되어 있으며 Fig. 6과 같다. 외부설계변수는 9개가 되며 각 외부설계변수가 갖는 값은 Table 3(5st)에 실려있고 외부최적화 과정중 10,890,963가지의 설계가 있으며 전설계공간중에서 69개의 국지최적설계가 발견되었다.

3경간 4층과 4경간 5층 평면뼈대구조물에서의 모든 설계변수는 Table 3에서 No열에 나타나는 번호 (1, 2, ... 7)중에서 하나를 그 값으로 취하며 이러한 번호로서 Table 3의 각 열에 나타나는 수치중 해당되는 수치를 지정하는 이산형자료(Discrete Data)들이다. 그리고 이런 이산형자료는 구조물의 형태, 크기 등 여러 가지 설계환경에 따라 적절히 선택될 수 있는 양이다.

4. 최적설계의 방법

일반적으로 최적설계방법에는 주어진 제약조건도의 도함수의 이용 여부에 따라 직접탐색방법과 간접탐색방법으로 나뉜다. 직접탐색 (Direct Search)에 의한 방법은 제약조건도의 Gradient를 이용해서 최적설계에 이르게 하는 간접적인 방법이 아니라, m개의 설계변수(x₁, x₂, ... , x_m)중 일부를 변화시키면서 목적함수 Y(x)를 평가한 후 그 값들을 서로 비교하여 최적설계(x*)에 도달하게 하는 방법이다. 따라서 직접탐색에 의한 최적설계에 있어서의 기본적인 문제는 x⁽¹⁾, x⁽²⁾, ... , x⁽ⁿ⁾의 설계가 주어졌을 경우, 이들 각각의 설계에 대한 목적함수 Y(x⁽¹⁾), Y(x⁽²⁾), ... , Y(x⁽ⁿ⁾)을 평가하고, 이 결과를 이용하여 다음 단계의 설계 x⁽ⁿ⁺¹⁾을 규정하는 일이라고 할 수 있다.

간접탐색(Indirect Search)에 의한 방법은 제약조건도의 도함수(Gradient)가 포함된 새로운 함수(Lagrangian)를 사용하여 이 함수를 평가한 후 설계값을 서로 비교하여 새로운 최적해의 가능성이 있는 방향으로 진행하면서 최적설계(x*)를 구하는 과정이며, 연속변수일 때 사용하는 방법으로 Powell Method, Optimality Criteria Method, SUMT 등이 있다.

본 연구에서는 설계변수를 이산형으로 하고, 직접 탐색방법에 의한 최적설계방법을 모색하였다. 최적설계방법은 2장에서 설명한 변수분리원리에 근거하고 있으며 최적화과정의 순서도가 Fig. 2에 나타나있다.

4.1 외부최적화

외부최적화 과정은 Fig. 2에서 보듯이 사실상 최적설계의 전과정을 의미하는 것이며 다만 내부변수(철근량)의 값의 결정을 다소 독립적으로 실행하는 내부최적화와 구별하기 위해 사용되는 말이다. RC 구조물의 해석시 각 부재의 강성의 계산에 철근의 영향을 고려하지 않으므로 외부변수(철근량이 제외된)의 값만 결정되어 있으면 구조해석이 가능하고 변위 제약의 만족 여부도 판단될 수 있다. 구조해석의 결과 각 부재의 소요강도가 결정되고 이 소요강도를 증가하는 설계강도를 가지도록 배근을 하되 가장 경제적인 배근방법을 찾는 과정이 내부 최적화라 하겠다. 이렇게 배근이 결정되면 구조물의 총 비용이 정해지고 이는 이전의 설계의 총 비용과 비교되어 어떤 설계(기존 설계 또는 새로운 설계)를 취할 것인가를 정

할 수 있다. 다음 외부변수의 일부(또는 전부)에 대한 값을 수정(증가 또는 감소)하고 재해석하며 위의 방법을 반복하게 된다. 이제 외부변수의 값을 수정하여 새로운 설계를 생성하는 작업은 상호 직교하는 좌표축의 방향을 따라 차례로 설계를 옮기는 작업인데, 모든 좌표축 방향의 이동이 시행되고 나면 다음은 모든 좌표축을 따라 설계가 이동되는 동안 설계의 개선이 있었는지를 판단한다. 만일 설계의 개선이 있었으면 위의 과정을 한번 더 수행할 가치가 있으며 때에 따라서는 상호직교 좌표축을 회전하여 위의 과정을 반복할 수도 있다.

외부최적화를 위하여 사용되는 몇가지 직접탐색방법은 아래와 같다.

- A. Method of Coordinate Descent.
- B. Method of Rotating Coordinates.
- C. Method of Pattern Search.
- D. Flexible Polyhedron Search.

Fig. 2는 위의 B방법을 그대로 나타낸다. 또한 Fig. 2에서 "Rotate the axes"를 제거하면 위의 방법 A가 된다.

위의 최적화기법들의 특성을 파악하기 위해서 모든 국지최적설계를 알고 있는 3경간 4층 구조물을 예로 하고, Table 3(4st)의 Design Data로 3가지의 Initial Design(Table 5)에서 출발하는 최적화를 실행했다. 각각의 초기설계로부터 위의 4가지 방법에 의해 얻어진 최종설계를 Table 6에 소개한다. Table 6에서 보는 바와 같이 어느 방법이건 설계변수의 초기치를 달리 잡으면 다른 국지최적설계로 수렴함을 알 수 있었고 이와 같이 각기 다른 설계를 Table 6에서는 Design 1, 2, 3이라 하였다. 또한 어느 방법도 전공간최적설계(Table 4, 설계 No.7, 269L33)를 찾아내지 못했다. 위의 여러 가지 최적화기법중 A, B방법은 초기값의 경우별로 같은 국지최적설계로 수렴함을 알 수 있고, C방법은 초기값의 변화에 대해 국지최적설계가 아닌 경우도 있지만 비교적 일정한 값에 접근함을 알 수 있다. D방법은 다른 여러 방법에 비해 큰 값이 나왔다.

본 연구에서는 설계변수의 초기치의 변화에 도 불구하고 비교적 비슷한 설계로 수렴하는 Pattern Search방법을 사용하기로 한다. 여기서 이 Pattern Search를 여러번 반복 실행하는 방법을 시도 하였고

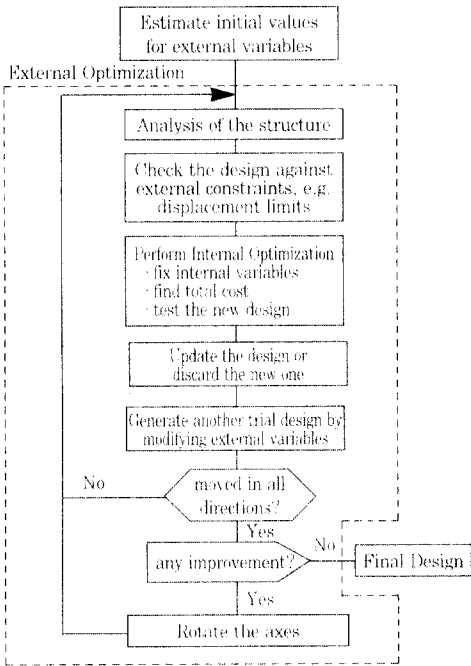


Fig. 2 Flow chart of optimization process

Table 5 Initial designs of 3-bay 4-story frame

Desg.1	No	2	2	2	2	2	2	2	2
Desg.2	No	2	2	2	2	2	2	2	2
Desg.3	No	3	3	3	3	3	3	3	3

Table 6 Designs of 3-bay 4-story frame

Method	Design 1	Design 2	Design 3
A	2693.06	2703.68	2703.68
B	2693.06	2703.68	2703.68
C	2704.32	2704.41*	2703.68
D	2700.64	2709.19	2709.19

*: not local minimum

이를 Modified Pattern Search방법이라 하였다.

외부최적화과정에 사용된 Modified Pattern Search의 단계별 과정은 다음과 같다.

1. 초기설계값을 주어진 데이터 (예로, Table 3)에서 선택한다.
2. Fig. 3에서와 같이 초기설계 I_1 에서 Pattern Search하여 설계 F_1 을 구한다. 같이하여 초기설계 I_2 로부터 설계 F_2 를 구한다. 설계 F_1 과 F_2 는 인접한 설계의경우와 인접하지 않은 설계의경우도 있다. 후자의 경우는 설계 F_1 과 F_2 사이에는 여러개의 설계가 존재할수 있다. 여기서 설계란 Index 번호의 나열이며 예로 $F_1 = \{1\ 1\ 1\ 2\ 3\ 4\ 4\ 4\}$ 은 하나의 설계이다.
3. Fig. 3에서와 같이 설계 F_1 과 F_2 의 중간설계 I_3 을 구하고, 다시 I_3 를 초기설계로하여 Pattern Search을 실행시켜 설계 F_3 를 구한다.
4. 설계 F_2 와 F_3 가 일치하거나 또는 두 설계의 차가 주어진 범위내에 오면 재실행과정을 멈추고, 그렇지 않으면 $F_2 = F_3$ 으로 놓고 3의 과정을 반복한다.

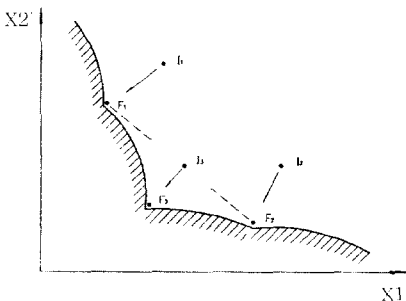


Fig. 3 Concept of modified pattern search

5. 재실행과정의 종료후 얻어진 설계중 가장최소의 설계를 택한다.

이 방법은 전설계공간 중 많은 국지최적설계가 존재할 경우 유용한 방법이라 할 수 있으며, 위 예의 3경간 4층 평면배대구조물의 경우 이 방법의 적용으로 구한 설계가 Global Minimum(2691.33)임을 확인하였다.

이 Modified Pattern Search과정을 다시 설명한 것이 Fig. 4이다.

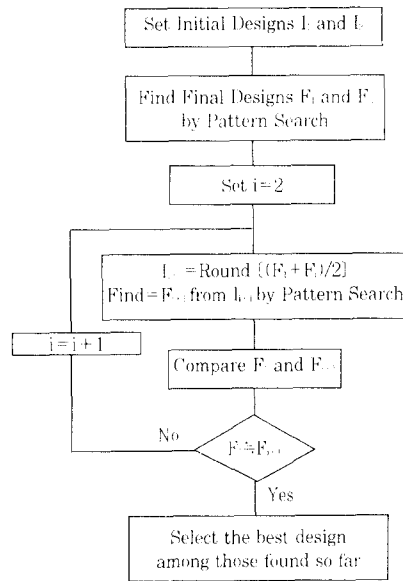


Fig. 4 Procedure of modified pattern search

4.2 내부최적화

내부최적화는 외부설계변수들의 값을 확정해놓은 상태에서 내부변수의 최적치를 찾아내는 과정으로 내부제약조건(설계강도 \geq 소요강도)을 만족시키면서 설계비용이 최소가 되는 철근량을 결정하는 과정이다. 외부, 내부변수 모두의 값이 결정되어야 각 부재별 설계강도계산이 가능하며 이는 내부제약조건식에 외부·내부변수가 모두 포함되어야 함을 뜻한다.

여기서 소요강도는 내부최적화 시작 전에 외부설계변수의 값만으로 결정된 것으로 내부최적화가 진행되는 동안에는 일정한 값을 유지하는 것으로 한다. 이는 외부변수가 결정(또는 변경)된 이후 시행하는

구조해석에서 각 부재의 강성(Rigidity, EA 및 EI)을 산정할 때 철근의 영향을 전혀 고려하지 않았기 때문에 내부변수인 철근량의 변동으로 인한 소요강도의 변화는 없기 때문이다. 본 연구에 사용된 소요강도는 ACI 318-89에 따라 (식 5)에 의한 하중조합으로 계산된 소요강도중에서 가장 큰 값을 택한 것이다.

1. $U = 1.4 D + 1.7 L$
2. $U = 0.75(1.4 D + 1.7 L + 1.7 W)$ (5)
3. $U = 0.9 D + 1.3 W$

여기서,

- U: 소요강도(Required Strength)
- D: 사하중을 위한 소요강도
- L: 활하중을 위한 소요강도
- W: 풍하중을 위한 소요강도

내부최적화의 설계변수(철근량)는 외부최적화의 설계변수의 결정과정과 같이 해당되는 번호(배근자료)중에서 결정된다. 이런 번호는 외부최적화의 콘크리트단면결정과는 달리 미리 규격화된 철근단면을 사용하여 작성되며, 이 또한 이산형자료로 취급된다. 여기서 번호(배근자료)란 내부변수가 가질 수 있는 값인 배근번호이며 이 배근번호는 기둥과 보에 대해 각각의 배근번호를 부여하고 한 배근번호로 여러 가지 값을 나타내며 그 내용은 Fig. 5에 소개된다. 본 연구에서 사용된 철근의 종류는 D19와 D22철근이다.

한 배근번호로 표시되는 A_s , A_s' 는 기둥단면일 경우 대개 철근배근(인장철근, 압축철근)을 대칭으로 하고 있으나 경우에 따라 일방향 횡하중을 받는 Portal Frame의 경우 설계자의 선택에 따라 다른 값을 갖게 할 수도 있다.

여기에서 기둥의 단면설계는 통상적인 방법인 서로 대칭되게 배근하여 배근번호를 부여하였다. 최소 폭은 외부변수로 확정된 단면의 폭이 이 배근을 수용할 수 있는지 여부를 알고자 하는 것이며 단위길이당 철근의 비용은 전체철근비용의 계산에 사용된다.

기둥과 보의 설계강도 산정과 필요설계강도를 위한 철근산정방법이 다르므로 그 과정을 별도로 설명한다.

4.2.1 기둥의 내부최적화

기둥에 대한 내부최적화는 기둥의 소요강도를 초과하는 설계강도가 되면서 철근량이 최소가 되는 배근을 선택하는 과정이다. 기둥의 소요강도는 (식 5)의 하중조합으로 계산된 소요강도중 가장 큰 값에 모멘트확대계수를 적용한 값이 된다.

본 연구에서 기둥은 세장의 효과를 고려하였으며, 이 세장효과는 2차 구조해석방법 대신 근사치인 모멘트확대계수(ACI 318-89, 10.11.5)를 적용하였다.

4.2.2 보에 대한 내부최적화

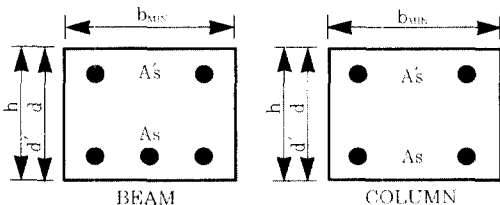
보의 내부최적화는 부재의 외력에 대한 소요강도가 부재단면의 설계강도보다 크지 않는 범위내에서 철근비용이 최소가 되는 배근을 선택하는 과정이다. 본 연구에서는 복철근단면을 사용하여 단면설계를 하였으며, 보의 소요강도는 (식 5)의 하중조합에 의한 소요강도에 기둥의 세장효과로 인한 모멘트의 확대분이 보에 분배된 것을 합한 것으로 하였다.

5. 설계 예제

변수분리의 원리를 이용하여 철근콘크리트구조물을 Modified Pattern Search방법으로 최적설계하였다. 그리고 다른 최적화기법과 서로 비교하여 이 방법의 정확도를 5층, 7층, 9층, 10층의 구조물에 대해 검증해 보았다.

5.1 4경간 5층 리아멘 구조물

이 구조물은 이미 모든 국지최적설계를 알고 있으나 새로운 최적화기법의 정확도를 검토하기 위해 예로 사용되었다. 이 구조물의 제원과 하중상태는 Fig.



A_s : Area of Tension Bar h : Overall Depth
 A_s' : Area of Compression Bar d : Cover
 b_{min} : Minimum Breadth for the Reinforcement

Fig. 5 Parameters of a reinforcement set

6에 소개된다. 외부최적화 과정에서 변수의 수는 9개가 되며, 각 변수가 가질 수 있는 값(Design Data)은 Table 3(st.5)에 실려있다. 이 자료(Table 3(st.5))로 4경간 5층 구조물에 대해 여러가지 최적화 기법들을 사용하여 나온 결과는 Table 7에서 주어진다.

Table 7 Designs of 4-bay 5-story frame

Class	Design1	Design2	Design3
A	4124.63	4299.10	4291.26
B	4124.63	4299.10	4291.26
C	4124.63	4157.78	4157.78
D	4250.18	4250.18	4365.48
E	4124.63		

4경간 5층 라아멘의 경우 Table 3(5st)에 주어진 자료에 의한 모든 국지최적설계를 바탕으로 새로 제시된 최적화방법 및 각 최적화기법에 대한 정확도를 비교할 수 있다. 여기서 A, B, C, D는 제 4장 Table 6에서 사용된 방법들을 말하며 E는 전술한 바의 본 연구를 통하여 고안한 Modified Pattern Search방법이다. 3가지의 Design경우(Design 1, 2, 3)를 비교해 볼 때 A, B방법은 같은 설계를 주며, C방법에서 Design 2, 3이 같음을 알 수 있다. D방법은 비교적 비용이 많은 설계를 주며, E방법은 Modified Pattern Search이다. 결과적으로 A, B, C, D, E 최적화기법중 초기치의 설정에 따라 다소의 차이는 있으나 D방법을 제외하고는 Design 1이 모두 전공간 최적설계이다. 따라서 본 연구에 제시된 방법(Modified Pattern Search)은 대체로 기존의 방법에 비해 보다 나은 방법임을 알 수 있다.

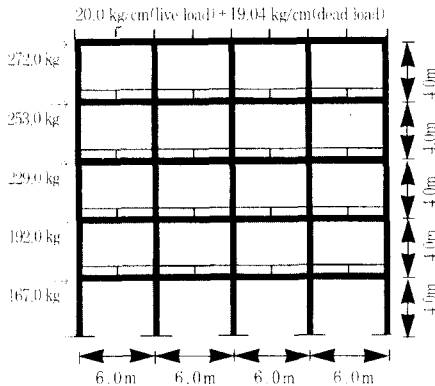


Fig. 6 A 4-bay 5-story frame

5.2 7층, 9층⁽⁷⁾, 10층 라아멘 구조물

7층과 10층은 4경간을 가진 구조물이며 한 경간은 6m이고 각층의 높이는 4m이다. 9층은 2층까지는 5경간이며 3층 이상은 3경간으로 경간과 층의 높이는 앞의 예와 같이 하였다. 각 구조물에 대해 Design 1, 2, 3, 4의 각기 다른 초기값을 사용하여 여러가지 최적화기법들이 적용된 결과를 Table 8, 9, 10에 소개한다.

7층 라아멘의 경우 Design 1, 2, 4를 초기치로 한 설계는 A, B방법에서 모두 같았다. C방법에서 Design 1, 4에 의한 설계는 같은 설계임을 알 수 있고, 다른 설계방법과 비교해 볼 때 안정된 방법임을 알 수 있다. 새로 제시된 E방법은 C방법의 Design 1보다 조금 클뿐 대체로 다른 방법의 결과보다 양호하다.

Table 8 Designs of 4-bay 7-story frame

Method	Desg.1	Desg.2	Desg.3	Desg.4
A	5726.94	5610.05	5610.05	5607.52
B	5726.94	5610.05	5660.20	5607.52
C	5603.21	5606.82	5610.05	5603.21
D	5866.81	5807.57	5781.37	5781.37
E		5606.82		

9층 라아멘의 외부최적화의 설계변수는 13개이며 4개의 다른 초기치에 대해 Design 1, 4에서는 A, B방법의 설계가 같았으며, C방법에서의 가장 나은 설계가 E방법의 설계와 동일하였다.

10층 라아멘의 외부최적화의 설계변수는 14개이며 이 경우 역시 E방법(Modified Pattern Search)에 의한 설계가 어느 다른 방법의 설계보다 훌륭하였으며 그 정도가 더 좋았다. 지금까지의 결과들로 볼 때 A, B, D방법에 의한 것보다는 C, E방법들에 의한 것이 비교적 나은 설계였으며, 또한 Table 7의 Design 1의 경우와 같이 훌륭한 초기값으로부터 훌륭한 결과치를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Table 9 Designs of 5-bay 9-story frame

Method	Desg.1	Desg.2	Desg.3	Desg.4
A	7918.60	7931.53	7929.28	8344.46
B	7918.60	7899.43	7918.77	8344.46
C	7893.63	7869.33	7909.33	7918.60
D	8976.12	9035.51	8082.96	8082.96
E		7869.33		

Table 10 Designs of 4-bay 10-story Frame

Method	Desg.1	Desg.2	Desg.3	Desg.4
A	8633.60	8855.68	8783.59	8929.96
B	8633.60	8855.68	8783.59	8929.96
C	8650.32	8732.04	8619.00	8747.88
D	8765.98	8765.98	8819.65	8664.32
E		8583.24		

6. 결 론

본 연구에서는 변수분리의 원리를 이용한 평면 RC배대 구조물의 최적설계의 한 방법을 제시하였다. 콘크리트강도와 단면의 재원을 외부변수로, 철근량을 내부변수로 분리함으로써 전체 설계공간을 부분설계공간(Subspace)으로 분리하여 취급하는 것이 가능해졌다. 이는 철근콘크리트 구조가 그 특성상 한 단면이 두가지의 재료로 구성되는데 따르는 어려움을 해소하고 오히려 보다 효율적인 방법이 될 수 있었다.

최적화기법(Search Method)으로 Coordinate Descent, Rotating Coordinates, Pattern Search, Flexible Polyhedron Search 등을 각각 활용하였으며 이중 Pattern Search방법이 시안설계(Trial Design)에 관계없이 하나의 최종설계(Final Design)로 수렴하는 경향을 갖고 있음을 발견하였다. 그리고 새로운 최적화기법인 Modified Pattern Search방법을 제시하였으며 다른 최적화기법보다 효과적임을 여러 예를 통하여 입증하였다. 본 연구에서 제시하는 최적설계방법은 실무에 직접 이용될 수 있으며, 여러 가지의 Design Data와 Trial Design으로 반복설계하여 얻어지는 여러 대안중에서 설계자의 주관적인 판단에 따라 최종설계를 결정하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. Cella, A. and Logcher, R., 'Automated Optimum Design from Discrete Components', Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST1, Jan, 1971, pp. 175-185.
2. Reinschmidt, K. F., 'Discrete Structural Optimization', Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST1, 1971, pp. 133-156.
3. Lai, Y. S. and Achenbach, J. D., 'Direct Search Optimization Method', Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST1, 1973, pp. 119-131.
4. 최창근, 박효경, '단면 데이터 베이스에 의한 RC부재의 최적설계', 전산구조공학회, 제2권 제1호, 1989, pp. 79-86.
5. Thanedar, P. B. and Vanderplaats, G. N., 'Survey of Discrete Variable Optimization for Structural Design', Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 2, 1995, pp. 301-306.
6. Krakovski, M. B. and Park, S. K., 'Optimization of reinforced concrete structures on the basis of the principle of divided parameters', Proceedings of the Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Seoul, Korea, 1993, pp. 1999-2004
7. 정석준, '철근콘크리트(RC) 배대 구조물의 최적설계', 울산대학교 토목공학과 석사학위 논문, 1993.
(접수일자 : 1996. 7. 16)