

직접탐색법을 이용한 RC 프레임 구조물의 설계 최적화

Design Optimization for RC Frame Structures Using Direct Search Method

곽 효 경* · 김 지 은**

Kwak, Hyo-Gyoung · Kim, Jieun

ABSTRACT

For the purpose of optimum design of RC frame structures, pre-determined section database of column and beam are constructed and arranged in order of the resisting capacity. Then, regression equations representing the relation between section number and resisting capacity are derived. In advance, effective optimization algorithms which search optimized solution quickly using direct search method from these database are proposed. Moreover, the investigation for the applicability and effectiveness of the introduced design procedure is conducted through correlation study for example structures.

Keywords: Database, Section Number, Resisting Capacity, Regression Equation, Direct Search Method

1. 서론

구조물의 최적설계는 목적함수를 어떻게 구성하느냐에 따라 다양화될 수 있으며, 특히 철근콘크리트(RC) 구조물은 재료의 가격이 구조물의 형태와 형식을 결정하는 중요한 요인이 되므로 요구되는 콘크리트와 철근의 양과 가격, 거푸집에 투입되는 비용 등을 통합적으로 고려하여(Camp 등, 2002; Kamal 등, 1998) 가격 최적화를 수행하고자 한다.

현실적으로 설계되고 있는 치수의 범위를 조사하여 설계 기준에 따른 제한 조건을 거쳐 데이터베이스로 구성하고(Choi 등, 1989) 이를 이용한 최적화 기법을 제시하였다. 먼저 철근콘크리트 구조물의 뼈대를 이루는 기둥과 보 부재에 대한 설계 단면 데이터베이스를 작성한 후, 이를 단면 저항 능력에 따라 정렬하여 단면 번호를 부여함으로써 단면 내의 여러 설계변수를 단면번호를 통해 관리할 수 있도록 도모하였다. 또한 구성된 단면 데이터베이스의 단면 번호와 단면 저항력 사이에 회귀분석식을 구성한 후 이를 이용하여 주어진 설계 조건에 따른 직접해(연속해)를 결정하고 이를 토대로 불연속 최적해를 직접탐색을 통해 결정한다.

* 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 Email: khg@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 Email: kje0310@yahoo.co.kr

2. 데이터베이스 구축

2.1 기둥 설계 단면 데이터베이스

철근콘크리트 구조물의 설계는 강도설계법의 적용을 원칙으로 하며(한국엔지니어링진흥협회, 2004), 이 논문에서는 건설교통부 제정 콘크리트구조설계기준(1999)에 따라 기둥과 보의 설계 단면 데이터베이스를 구성하였다(KCI, 1999; Nilson, 등, 2003).

사각형 RC 기둥의 단면 데이터베이스는 설계변수인 기둥의 폭(B)과 높이(H), 각 변 및 모서리부에 배근된 철근의 개수, 설계 단면의 철근비, 강도감소계수가 고려된 기둥 단면의 P-M 상관도와 사용 재료인 콘크리트, 철근 및 거푸집을 포함한 단면 가격을 포함하게 된다. 또한 단면 치수는 5cm 간격으로 변화시켜가면서 높이가 폭의 1~1.5배 범위가 되도록 조정하였다. 이와 같이 생성된 데이터베이스는 기둥 단면의 외력에 대한 저항 능력(capacity)을 대표한다고 가정한 P-M 상관도의 면적 순으로 정렬되어 단면 번호를 부여하였다.

표 1 D25 철근을 사용한 RC 기둥 데이터베이스의 일부

N	B (mm)	H (mm)	BS (n)	HS (n)	CS (n)	ϕM_{\min} (kgf-cm)	ϕP_0 (kgf)	ϕM_b (kgf-cm)	ϕP_b (kgf)	ϕM_0 (kgf-cm)	COST (천 원)
1	300	300	0	0	4	260408.4	157126.8	975274.8	49291.72	696638	12.55231
2	300	300	0	1	4	248249.4	177856.2	976464.3	47425.36	763382	12.55247
3	300	300	1	0	4	294360.9	177856.2	1177081	44518.74	990454	12.55247
4	300	300	0	2	4	293034.5	198585.6	1131021	56612.45	869063.7	12.55263
5	300	300	1	1	4	284546.3	198585.6	1178271	42652.39	1040279	12.55263

2.2 보 설계 단면 데이터베이스

보 부재는 극한휨모멘트를 토대로 단면 데이터베이스를 구축하며, 실 설계에서의 단면에 대한 여러 제한조건을 토대로 높이가 폭의 1.5~2.5배 범위가 되도록 조정하였다.

표 2 D22 철근을 사용한 RC 보 데이터베이스의 일부

N	B (mm)	H (mm)	TS (n)	CS (n)	ρ	ϕMn (kgf-cm)	COST (천 원)
1	200	350	2	2	0.012	802463	11.14624
2	200	400	2	2	0.01	931708	12.26424
3	250	400	2	2	0.008	933969	13.67024
4	200	450	2	2	0.009	1060953	13.38224
5	250	450	2	2	0.007	1063214	14.86024

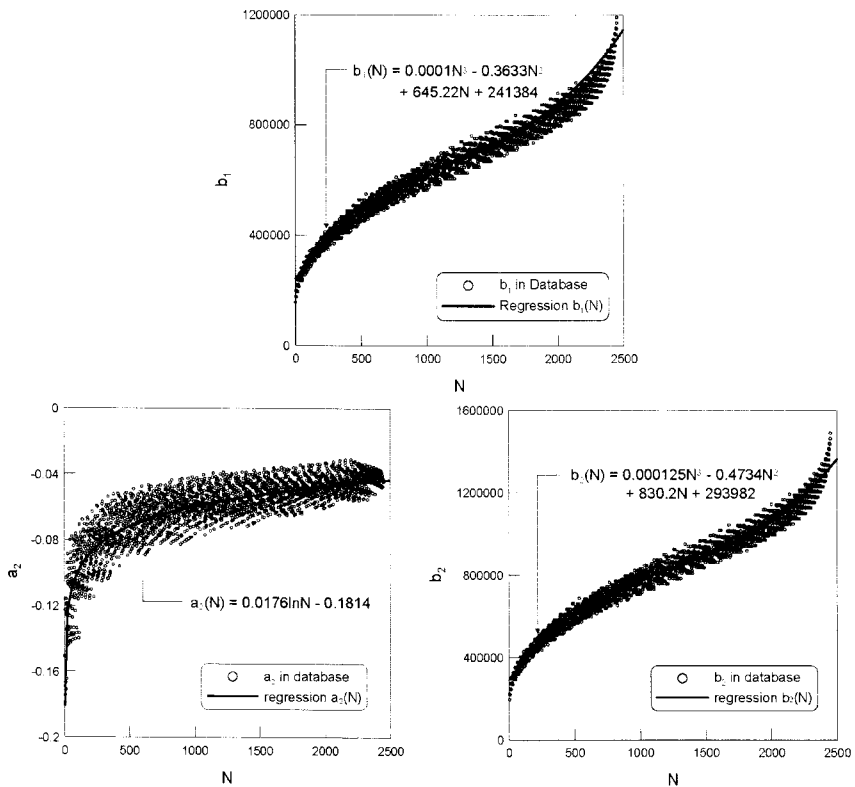
3. 연속해의 결정

3.1 RC 기둥의 연속해

기둥 단면의 저항 능력은 P-M 상관도로 표현되며, 축력에 지배(영역 I), 축력과 모멘트가 동시에 지배(영역 II), 보와 같이 휨에 지배되는 경우(영역 III)로 구분되므로 P-M 상관도를 이에 따라 세 영역으로 구분하고 각 영역에 대해 회귀분석식을 구성하여 이로부터 1차 해를 추정한다.

표 3 P-M 상관도 각 영역의 직선식

영역	관계식
I	$y_1 = \phi P_0 = b_1(N)$
II	$y_2 = \frac{\phi P_0 - \phi P_b}{\phi M_{min} - \phi M_b} x + \left(\phi P_0 - \phi M_{min} \frac{\phi P_0 - \phi P_b}{\phi M_{min} - \phi M_b} \right) = a_2(N)x + b_2(N)$
III	$y_3 = \frac{\phi P_b}{\phi M_b - \phi M_0} x + \left(-\frac{\phi P_b \cdot \phi M_0}{\phi M_b - \phi M_0} \right) = a_3(N)x + b_3(N)$



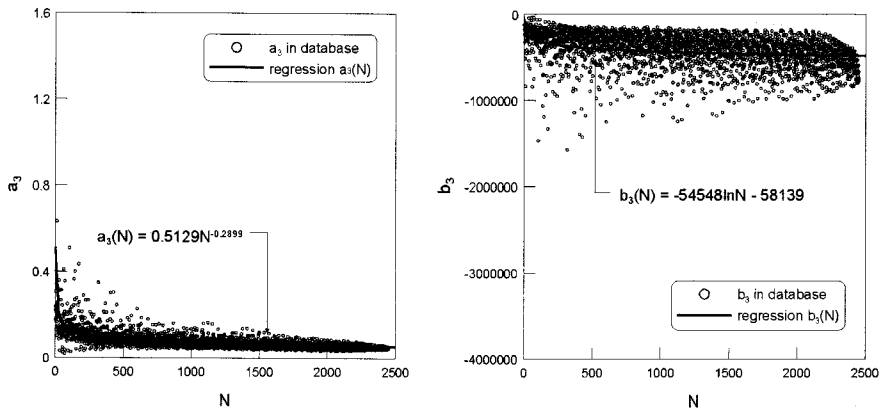


그림 1 단면 번호 N에 따른 각 계수의 회귀분석식

3.2 RC 보의 연속해

RC 보의 단면 데이터베이스는 단면 성능인 공칭휨모멘트가 단면 번호에 대해 1:1로 단조증가하는 양상을 보이므로 매우 정확한 회귀분석식을 얻을 수 있다.

$$N(M_x) = 21.881 - 4.8 \times 10^{-5} \cdot M_x + 2.5 \times 10^{-11} \cdot M_x^2 - 8.7 \times 10^{-19} \cdot M_x^3 \quad (1)$$

3.3 강성에 따른 회귀분석식

프레임 구조물의 구조해석은 구성 부재의 휨강성(EI)과 축력에 대한 강성(EA)이 요구되는데(Smith 등, 1998), 경우 단면 성능이 증가할 경우라 할지라도 강성은 오히려 감소하게 되는 경우가 발생하여 해석 및 최적설계의 반복 과정에서 해의 변동(fluctuation)이 반복되는 수치상 오류가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 콘크리트와 철근을 모두 고려한 RC 부재의 휨강성과 축방향 강성을 모멘트-곡률 관계(Park 등, 1975)를 토대로 산정한 후 이를 해석에 이용하였다. 또한 이와 같이 결정된 휨강성 EI_m, 축방향 강성 EA_m을 단면 번호 N에 대해 회귀분석식으로 구성한 EI_r, EA_r을 1차 연속해 검색시 이용함으로써 전체 최적설계 과정의 수렴 효율을 증대시켰다.

4. 불연속해의 결정

기둥 단면의 가격 최적화를 위한 과정은 다음과 같이 연속해인 N_{initial}을 결정하기 위한 1차 해석 및 최적설계를 위한 반복 과정과 불연속 최종해 N_{final}을 결정하기 위한 2차 반복 과정으로 구분되며 이를 그림 2에 나타내었다. 보도 이와 마찬가지로의 과정을 거쳐 최적설계를 수행한다.

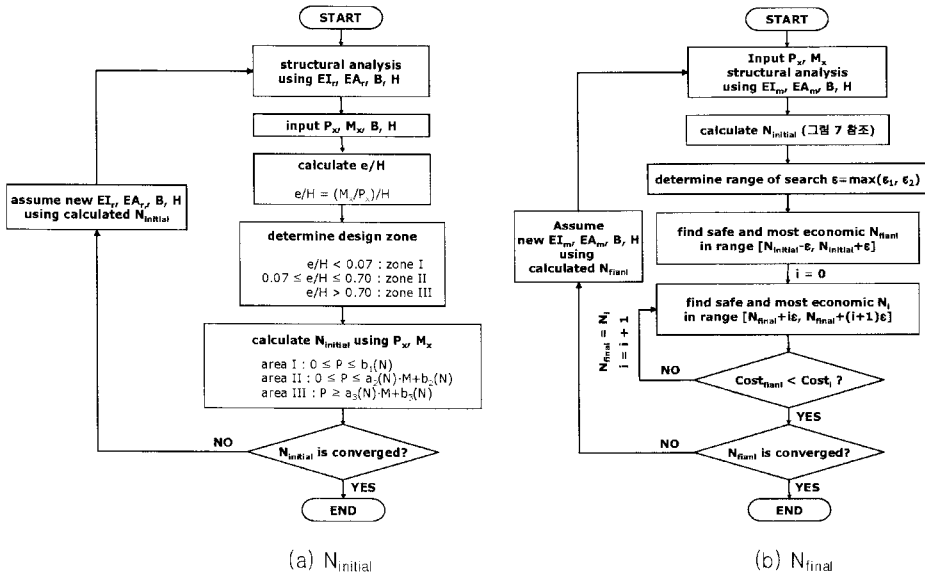
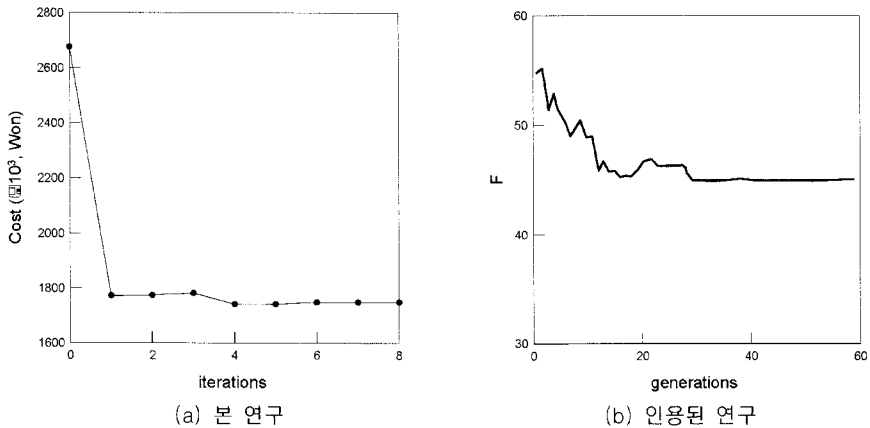


그림 2 기둥 가격 최적화에서 기둥의 연속해 $N_{initial}$ 및 N_{final} 결정을 위한 최적설계 알고리즘

5. 최적설계 예

제안된 최적화 기법의 효율성을 검토하기 위해 이전 연구에서 인용된 예제 구조물에 대한 최적설계를 수행하고 그 결과를 비교하였다. 대상 예제는 Lee와 Ahn(2003)이 제안한 Genetic Algorithm에 기반하여 데이터베이스로부터 최적해를 검색하는 연구에서 이용된 3 bay - 3 floor 프레임 구조물이다. 작용 하중은 16.5kN/m의 고정하중과 7.2kN/m의 활하중으로, 각각 1.4, 1.7의 하중 계수를 적용하였다. 이 때 기둥 높이는 3.6m, 보 길이는 9m, 설계에 이용된 콘크리트의 압축강도는 23.5MPa, 철근의 항복강도가 392MPa, 철근 직경은 기둥에 대해서 D25, 보에 D22를 사용하였다.



(a) 본 연구 (b) 인용된 연구

그림 3 반복 최적설계에 따른 구조물의 가격 수렴 양상

수렴 속도 면에서 인용된 연구의 경우 Genetic Algorithm에 기반한 반복 설계 과정에서 각 단계마다 최적해 검색을 위한 대상 해를 선정할 때 무작위적으로 해를 선정하는 방식을 택하므로 해의 수렴도가 떨어지게 되는 단점을 지니는 반면, 본 연구에서는 다음 단계의 해의 선정이 해석 결과에 기반하여 일관성 있게 진행되므로 빠른 수렴 양상을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 효율적인 최적설계를 위해 설계 기준과 실무상의 제한 조건에 부합하는 기둥과 보 부재의 설계 단면으로 구성된 데이터베이스를 구축하고, 이를 토대로 각 부재의 하중에 대한 저항 능력과 단면 번호간의 관계를 회귀분석식으로 구성하여 빠르게 최적해를 검색하는 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 최적설계의 전 과정을 매우 단순하면서도 효율적인 회귀분석식을 이용한 직접 탐색법에 기반하므로, 목적 함수 구성시의 제한 조건이나 많은 반복 작업을 위해 발달된 컴퓨터 성능을 요구하는 등의 제약이 없다는 장점이 있으며 최종해 결정시까지 빠른 수렴 양상을 보이며 수렴도 또한 높다.

참 고 문 헌

- 한국콘크리트학회·대한건축학회 (1999) **콘크리트구조설계기준**, 건설교통부
- 한국엔지니어링진흥협회 (2004) **철근콘크리트 구조물의 한계상태 설계법**, 과학기술부
- 최창근, 곽효경 (1989) 단면 데이터 베이스에 의한 RC 부재의 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 2(1), pp. 79-86
- Camp, C. V., Pezeshk, S. and Hansson, H. (2002) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(1), pp. 105-115.
- Kamal, C. S. And Adeli, H. (1998) Cost Optimization of Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(5), pp. 570-578.
- Lee, C. and Ahn, J. (2003) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(6), pp. 762-774.
- Park, R. and Paulay, T. (1975) *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.
- Smith, I. M. and Griffiths, D. V. (1998) *Programming the Finite Element Method*, John Wiley & Sons.