

데이터베이스에 기반한 RC 평면 프레임 구조물의 최적설계

Optimum Design of Reinforced Concrete Plane Frames Based on Section Database

곽 효 경* 김 지 은*

Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Ji-Eun

(논문접수일 : 2006년 9월 4일 ; 심사종료일 : 2007년 4월 2일)

요 지

이 논문에서는 철근콘크리트 구조물의 최적설계를 위해 기둥과 보 부재 설계 단면의 데이터베이스를 구성하고 이로부터 단면 번호와 단면 저항 능력간의 관계를 나타내는 회귀분석식을 구성하여, 직접 탐색법으로 빠르게 최적해를 검색하는 효율적인 알고리즘을 제안하였다. 설계 실무에서 가격을 고려하여 설계하기보다는 성능 최적화에 가까운 설계를 수행한다는 사실로부터 제안된 알고리즘을 이용하여 성능 최적화와 가격 최적화를 모두 수행하여 그 결과를 비교·검토하였고, 예제 구조물을 대상으로 적용성과 효율성을 검토하였다. 본 알고리즘은 목적 함수 구성시 제한 조건이 없고 전개 과정이 매우 단순하면서도 빠른 수렴성을 보이며 선택된 해가 설계 기준과 실무상의 제한 조건에 부합하므로 바로 적용 가능하다는 장점이 있다. 전체 구조물의 최적화는 개별 부재의 최적화를 통해 이루어진다.

핵심용어 : 데이터베이스, 단면 번호, 단면 저항 능력, 회귀분석식, 직접 탐색법

Abstract

For the purpose of optimum design of reinforced concrete 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 section resisting capacity are derived. In advance, effective optimization algorithms which search optimized solution quickly using direct search method from these database are proposed. In practice, from the fact that engineers conduct member design close to capacity optimization rather than cost optimization, both capacity and cost optimization using proposed algorithms are performed, and the review for the obtained results are followed. Moreover, the investigation for the applicability and effectiveness of the introduced design procedure is conducted through correlation study for example structures. Because of no restriction in constructing objective functions with very simple optimization processes and fast convergence, the introduced method can effectively be used in the preliminary design stage. Especially, selected solutions from database are directly applicable in practice because these sections already satisfy all the requirements in design codes and practical restrictions.

Keywords : database, section number, section resisting capacity, regression equation, direct search method

1. 서 론

일반적으로 구조물의 최적설계는 가격을 최소화하거나 중량을 최소화하는 등 목적함수를 어떻게 구성하느냐에 따라 다양화될 수 있다. 특히 철근콘크리트(RC) 구조물은 설계와 시공시 재료의 가격이 구조물의 형태와 형식을 결정하는 중요한 요인이 되는데 가격에 대한 주요 영향 인자는 요구되는

콘크리트와 철근의 양과 가격, 노동력과 거푸집에 투입되는 비용 등을 들 수 있다. 이 가운데 노동력은 평가하기 어려운 인자이므로, 주로 노동력과 거푸집의 가격을 통합적으로 고려하는 것이 일반적이다(Camp 등, 2002; Kamal 등, 1998). 따라서 본 논문에서 언급하는 가격은 콘크리트, 철근 및 거푸집에 대한 재료 가격만을 의미한다.

단일 재료로 구성되는 철골 구조물은 중량의 최적화가 가격

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

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

E-mail: khg@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

최적화를 의미하게 되며 주 재료인 형강의 경우 부재의 중량이 단면적으로부터 결정되고 이 단면적이 대체로 부재의 저항 강도와 비례하는 양상을 띠게 되어 목적 함수의 최적값에 도달하는 과정이 상대적으로 순조로운 측면이 있다(Chan 등, 1994; Pezeshk 등, 2000). 그러나 철근콘크리트 부재의 경우 콘크리트로 둘러싸인 단면의 외곽 치수 뿐 아니라 내부에 배치되는 철근의 개수와 위치 등에 따라 부재의 저항 강도가 각기 다른 양상을 보이므로 하나의 단면 내에서도 상대적으로 많은 설계변수가 존재하게 되어 최적해에 이르는 과정 또한 보다 복잡해지게 된다(Rapiq 등, 1998; Ferreira 등, 2003; Govindaraj 등, 2005).

그럼에도 불구하고 많은 연구자들에 의해 수학적 프로그래밍에 기반을 둔 전통적인 최적화 기법(Camp 등, 2002)을 적용한 철근콘크리트 구조물의 최적설계가 이루어지고 있다. 그러나 대표적인 수학적 프로그래밍 방법인 Lagrangian multipliers법, convex programming 등(Belegundau 등, 1999; Rao, 1996)의 경우 연속이고 미분 가능한 목적 함수에 적용 가능하며 설계 변수가 연속해로 도출되어 이산형 설계 변수를 갖는 철근콘크리트 구조물의 설계에 직접 적용하는 데에는 여러 어려움이 있으며, simplex method 등 linear programming(Belegundau 등, 1999; Rao, 1996)의 경우 목적함수와 제한조건이 선형함수일 경우만 적용 가능하다는 제한이 있다. 한편 비교적 최근에 도입된 기법으로 많이 이용되는 genetic algorithm(Lee 등, 2003; Leps 등, 2003)은 데이터베이스와 발달된 컴퓨터 성능을 이용하여 해의 무작위 추출 후 비교하는 과정을 반복하는 방식으로 반복 작업 횟수가 많아지는 단점이 있다(Lee 등, 2003).

철근콘크리트 구조물은 부재 치수와 철근의 양에 있어서 이론적으로 거의 무한대의 조합으로 설계를 수행할 수 있다(Choi 등, 1989; Choi 등, 1990). 그러나 실제로는 시공상의 편의를 위해 기둥, 보 등의 부재 치수는 일반적으로 5cm(2in.) 단위로 차이를 두어 설계하고 있으며, 철근의 배치 또한 각국의 설계 규준에 맞추어 최소 및 최대철근량이 제한하는 범위 내에서 철근 간격 규정에 따라 최대 2단 배근까지로 제한하고 있는 실정이다(KCI, 1999; ACI, 2003). 따라서 현실적으로 설계되고 있는 치수의 범위를 조사하여 적절한 제한 조건을 거쳐 데이터베이스로 구성하는 것이 가능하며, 이를 이용하여 최적화를 수행할 경우 도출된 해는 설계에 바로 이용될 수 있는 해가 되어, 경제적이면서도 현실적인 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

이를 위해 이 논문에서는 데이터베이스를 효율적으로 다룰 수 있는 최적화 기법을 제시하고자 한다. 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 결정하게 된다.

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 단면 내의 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. 특히 단면 데이터베이스는 사용되는 설계조건인 선택한 철근의 종류(주철근 및 띠철근의 항복강도 및 직경), 콘크리트 압축강도, 피복두께, 철근 순간격, 단면 치수(폭, 높이)의 범위 및 재료의 단위 가격을 이용하여 구축하게 된다. 또한 단면 치수는 5cm 간격으로 변화시켜가면서 높이가 폭의 1~1.5배 범위가 되도록 조정하였다(Choi 등, 1989, 1990). 뿐만 아니라 철근은 모서리부에 기본적으로 배치되는 4개를 제외하고 각 면을 따라 0에서부터 최대 배근 가능한 철근 개수까지 모든 철근 개수의 조합으로 데이터를 생성하였으며, 규준(KCI, 1999)에 따른 철근 간격의 제한과 최소 및 최대철근비 규정을 적용하였다. 콘크리트 기둥의 단위 길이당 단면 가격은 다음과 같이 산정한다.

$$C_{sect} = C_c \times B \times H + C_s \times w_s \times (N_B \times 2 + N_H \times 2 + N_C) + C_f \times (B \times 2 + H \times 2) \quad (1)$$

여기서, C_{sect} , $C_c=28.8$, $C_s=19.7$, $w_s=7.8$, N_B , N_H , N_C , 그리고 $C_f=8.3$ 은 각각 단면 가격인 COST(천원), 레미콘 콘크리트 가격(천원/m³), 철근 가격(천원/ton), 철근의 직경에 따른 단위 중량(ton/m³), 폭(N_B), 측면(N_H)

표 1 D25 철근을 사용한 RC 기둥 데이터베이스의 일부

N	B (mm)	H (mm)	BS (n)	HS (n)	CS (n)	φMmin (kgf-cm)	φP0 (kgf)	φMb (kgf-cm)	φPb (kgf)	φM0 (kgf-cm)	COST (천원)
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
6	300	350	0	0	4	358135.3	176404.8	1315140	58558.08	863535	13.81431
7	300	300	2	0	4	328351.8	198585.6	1378888	39745.77	1280468	12.55263
8	300	350	0	1	4	424315	197134.2	1380739	86047.01	930279	13.81447
9	300	300	1	2	4	328726.4	219315	1332828	51839.48	1123402	12.55278
10	350	350	0	0	4	405948	198895.8	1454757	70428.83	956701	15.14831
11	300	300	2	1	4	320268.1	219315	1380078	37879.41	1320314	12.55278
12	300	350	1	0	4	394349.2	197134.2	1553862	52224.84	1240799	13.81447

및 모서리부에 배근되는 철근 개수 ($N_c=4$) 및 갱폼 가격(천원/ m^2)을 나타낸다.

이와 같이 생성된 데이터베이스는 기둥 단면의 외력에 대한 저항 능력(capacity)을 대표한다고 가정된 P-M 상관도의 면적 순으로 정렬되어 단면 번호를 부여하였으며, 표 1은 구성된 RC 기둥 단면 데이터베이스의 일부를 나타내고 있다.

표 1에서 BS, HS, CS는 각각 폭, 측면과 모서리에 배근된 철근의 개수를 나타내며, 강도감소계수 ϕ 는 국내 콘크리트구조설계기준(1999)에 따라 M_{min} , P_0 , M_b , P_b 에 대해서는 0.7, M_0 에 대해서는 0.85를 적용하였으며, kgf, cm 단위로 산정하였다.

2.2 보 설계 단면 데이터베이스

RC 기둥과 동일한 방법에 의해 RC 보에 대한 단면 데이터베이스를 구성하게 되는데, RC 기둥과 다른 점은 보 부재는 휨모멘트가 지배적으로 작용하는 관계로 기둥의 저항력인 P-M 상관도 대신 극한휨모멘트를 토대로 단면 데이터베이스를 구축하게 된다. 이때 실 설계에서의 단면에 대한 여러 제한조건을 토대로 높이가 폭의 1.5~2.5배 범위가 되도록 조정하였다(Choi 등, 1989, 1990). 단면 폭에 대해 실제적으로 배근 가능한 모든 철근 개수의 조합으로 데이터를 생성시키며, 이때 실무상의 현실을 감안하여 최소 2개의 압축축 철근이 배근된 복철근 단면으로 최대 2단까지 배근하였다. 또한 철근 간격과 최소 및 최대 철근비 규정을 만족하도록 배근하였으며, 압축축 철근보다는 인장축 철근이 같거나 더 많도록 조정하였다. 보의 단위 길이당 단면 가격은 식 (2)와 같이 산정하며 표 2는 구성된 RC 보의 단면 데이터베이스의

표 2 D22 철근을 사용한 RC 보 데이터베이스의 일부

N	B (mm)	H (mm)	TS (n)	CS (n)	ρ	φMn (kgf-cm)	COST (천원)
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
6	200	500	2	2	0.008	1190198	14.50024
7	200	350	3	2	0.017	1192154	11.1463
8	250	500	2	2	0.006	1192459	16.05024
9	200	350	3	3	0.017	1199167	11.14636
10	200	400	3	2	0.015	1386022	12.2643
11	250	400	3	2	0.012	1389862	13.6703
12	200	400	3	3	0.015	1393035	12.26436

일부를 나타내고 있다.

$$C_{sect} = C_c \times B \times H + C_s \times w_s \times (N_{TS} + N_{CS}) + C_f \times (B \times 2 + H \times 2) \quad (2)$$

여기서, N_{TS} 와 N_{CS} 는 각각 인장철근 개수와 압축철근 개수를 나타낸다.

3. 연속해의 결정

3.1 RC 기둥의 연속해

구축된 기둥과 보 설계 단면의 데이터베이스를 이용한 최

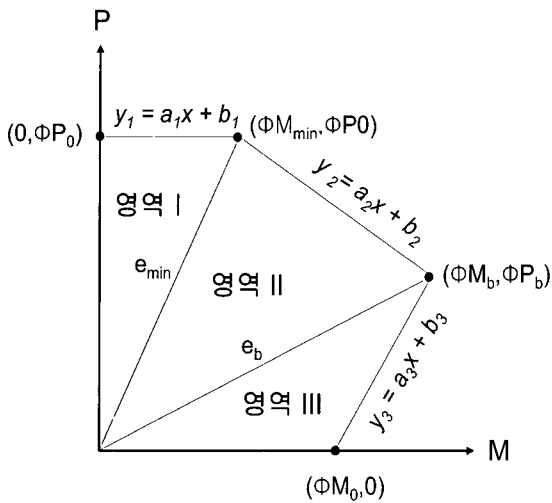


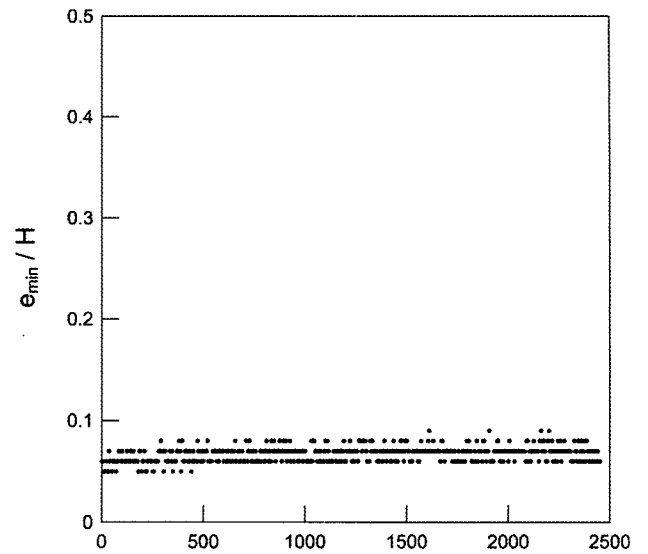
그림 1 P-M 상관도와 영역의 구분

적설계를 수행하기 위해 각 데이터베이스의 단면 번호와 설계 단면의 외력에 대한 저항 능력(capacity) 간의 관계를 회귀분석을 통해 식으로 도출하여 주어진 부재력 조건에 따라 수식을 이용하여 1차적인 해를 추정함으로써 데이터베이스 내에서 최적의 해를 결정하기 위한 초기점(starting point)으로 설정하고자 한다.

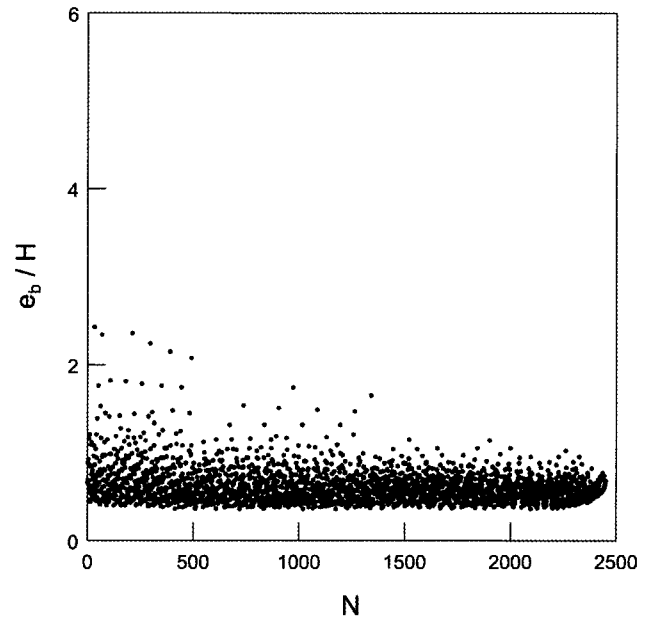
기둥의 경우 단면의 저항 능력은 P-M 상관도(그림 1 참조)로 표현되며, 축력과 모멘트에 동시에 저항하는 부재의 특성상 기둥의 거동이 축력에 의해 지배를 받는 경우(영역 I), 축력과 모멘트의 영향을 함께 받는 경우(영역 II), 보와 같이 휨에 지배되는 경우(영역 III)로 구분되므로 P-M 상관도를 이에 따라 세 영역으로 구분하고 각 영역에 대해 회귀분석식을 구성하였다.

먼저 그림 1에서와 같이 축력에 의해 지배되는 영역 I, 축력과 휨에 의해 동시에 지배되는 영역 II와 휨에 의해 지배되는 영역 III으로 구분할 수 있으며, 각 영역을 구분하는 기준으로 모멘트와 축력의 비인 편심 e 를 이용할 수 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 구성된 데이터베이스 내에서 최소편심 e_{min} , 균형편심 e_b 와 기둥 단면의 높이 H 의 비는 비교적 일정한 값에 근접하는 분포를 가지고 있어 이로부터 e_{min}/H 에 대해 0.07, e_b/H 의 경우 0.7의 일정한 값을 기준값으로 정하여 e/H 값이 0.07 이하일 때 영역 I, 0.07 이상일 때 영역 II, 0.7 이상일 때 영역 III에서 거동한다고 가정하였다.

기둥 부재의 설계시 부재에 작용하는 하중 상태가 P-M 상관도의 내부에 속할 때 안전한 것으로 평가할 수 있으므로 각 영역의 경계선을 나타내는 영역 I의 직선식 $y_1 = a_1x + b_1$, 영역 II에서는 $y_2 = a_2x + b_2$, 영역 III에서는 $y_3 = a_3x + b_3$



(a) e_{min} 과 N의 관계



(b) e_b 와 N의 관계

그림 2 편심과 높이 비의 단면 번호에 따른 분포

표 3 P-M 상관도 각 영역의 직선식

영역	관계식
I	$y_1 = \phi P_0 = b_1(N)$ (3)
II	$y_2 = \frac{\phi P_0 - \phi P_b}{\phi M_{min} - \phi M_b} x + \left(\phi P_0 - \phi M_{min} \frac{\phi P_0 - \phi P_b}{\phi M_{min} - \phi M_b} \right)$ $= a_2(N)x + b_2(N)$ (4)
III	$y_3 = \frac{\phi P_b}{\phi M_b - \phi M_0} x + \left(-\frac{\phi P_b \cdot \phi M_0}{\phi M_b - \phi M_0} \right) = a_3(N)x + b_3(N)$ (5)

에 의해 구성된 영역 내부가 안전한 영역이 된다. 좌표축 x 와 y 는 각각 기둥에 작용하는 휨모멘트 M_x 와 축력 P_x 를 나타

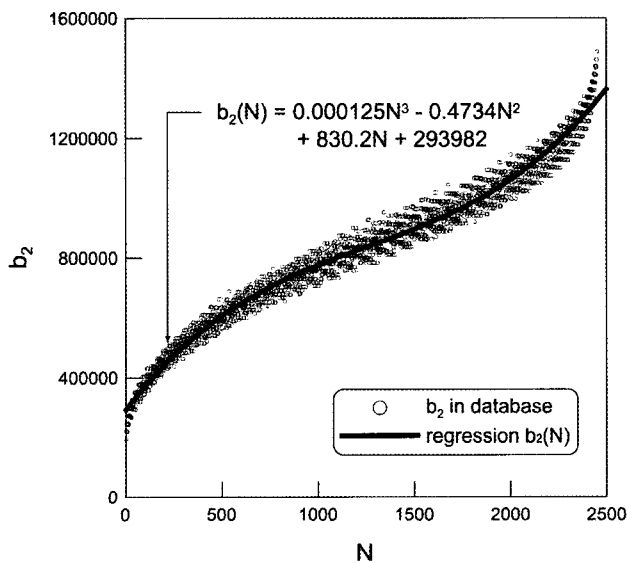
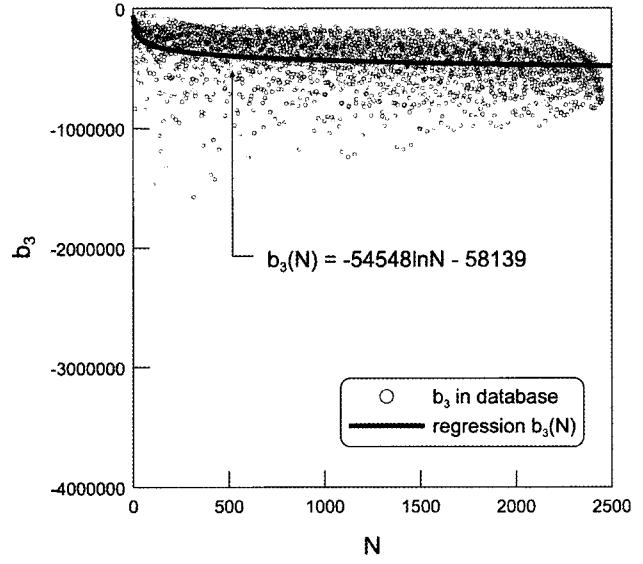
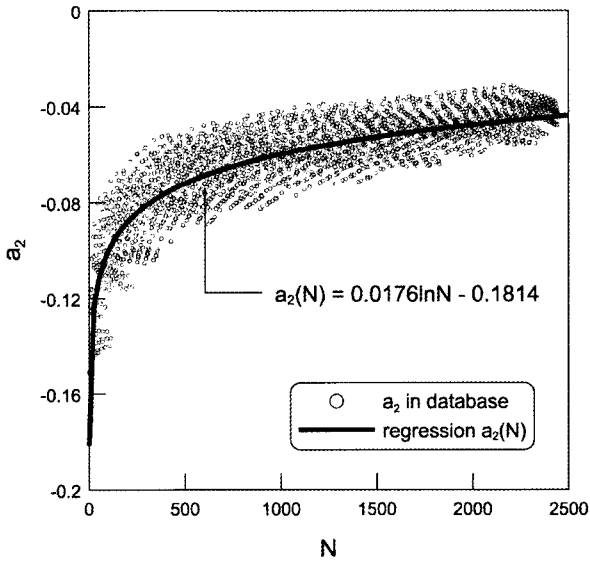
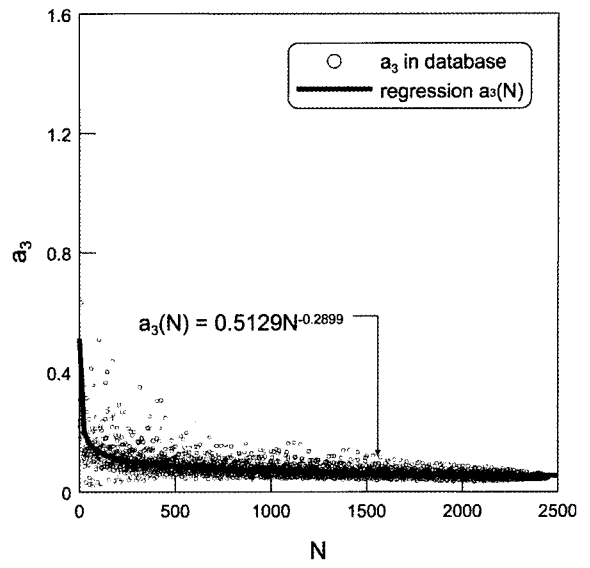
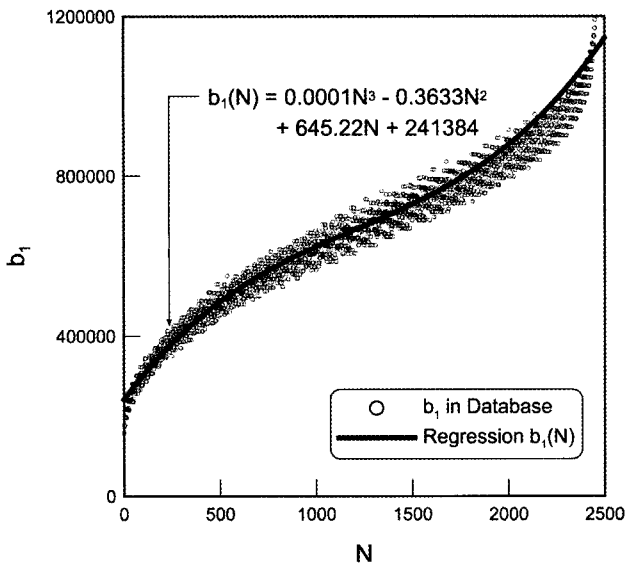


그림 3 단면 번호 N에 따른 각 계수의 회귀분석식

내고 있으며, 각 영역에 대한 직선식의 계수 $a_1 \sim a_3$ 및 $b_1 \sim b_3$ 를 구성된 기둥 단면의 데이터베이스로부터 회귀분석을 통해 단면 번호 N 의 함수로 나타낼 수 있게 되는데 각 직선식은 표 3과 같다.

그림 3에 명시한 각 계수의 식에서와 같이 단면 번호의 함수로 나타내어진 계수 $a_1 \sim a_3$ 및 $b_1 \sim b_3$ 를 식 (3), (4), (5)에 각각 대입하여 정리하면 작용하는 부재력 (M_x , P_x)가 영역 I의 경계를 넘지 않기 위해서는 $P_x \leq b_1(N)$, 영역 II의 경계를 만족하기 위해서는 $P_x \leq a_2(N)M_x + b_2(N)$, 영역 III의 경계를 만족하기 위해서는 $P_x \geq a_3(N)M_x + b_3(N)$ 을 각각 만족해야 한다. 따라서 이 관계를 만족하는 단면 번호 N 의 설계 단면이 안전측에 속하므로 하중 조건에 따른 부재력

(M_x, P_x)에 대하여 회귀분석식을 이용한 1차 연속해 N 을 얻을 수 있다. 그림 3에서 전체 N 의 범위에 대해 각 영역에서 a, b 가 동시에 단조증가 또는 단조감소의 일정한 경향을 보이고 있으므로, N 의 값은 bi-section method 등을 이용하여 효율적으로 결정할 수 있다. 나아가 결정된 연속해의 단면 번호를 시작점으로 하여 최적의 불연속해를 찾음으로써 보다 효과적인 불연속해의 결정을 도모할 수 있게 된다. 여기서, 부재력 M_x, P_x 는 각각 kgf-cm, kgf 단위이다.

3.2 RC 보의 연속해

RC 보의 단면 데이터베이스는 단면 성능인 공칭휨모멘트가 증가하는 순서로 배열되어있는 관계로 그림 4에서 보는 바와 같이 단면 번호에 대해 1:1로 단조증가하는 양상을 보이므로 분산도가 상대적으로 큰 기동과 달리 매우 정확한 회귀분석식을 얻을 수 있다. 따라서 주어진 부재력 휨모멘트 M_x 에 대응하는 단면 번호 N 을 회귀분석식 (6)을 토대로 간단하게 결정하게 된다.

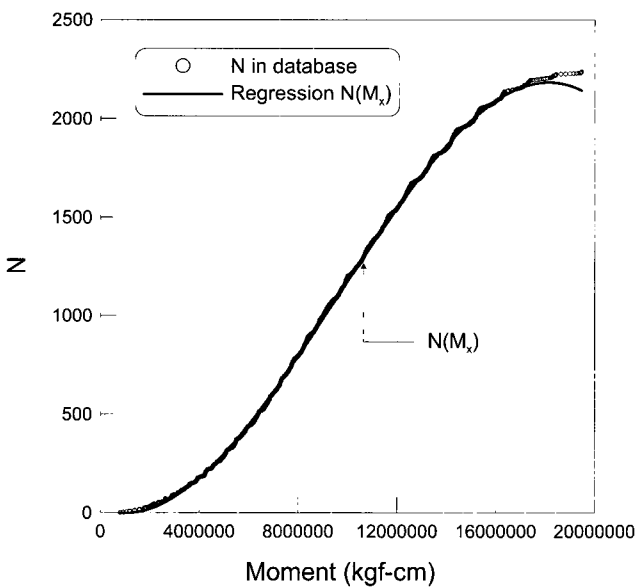


그림 4 공칭휨강도에 따른 단면 번호 N의 분포

$$N(M_x) = 21.881 - 4.8 \times 10^{-5} \cdot M_x + 2.5 \times 10^{-11} \cdot M_x^2 - 8.7 \times 10^{-19} \cdot M_x^3 \quad (6)$$

3.3 강성에 따른 회귀분석식

프레임 구조물의 구조해석은 구성 부재의 휨강성(EI)과 축력에 대한 강성(EA)이 요구되는데(Smith 등,1998) 이

때 E 값은 콘크리트의 탄성계수인 E_c , 2차관성모멘트 I와 콘크리트 단면적 A에 기반하여 산정하여 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 이 경우 단면 성능(보는 휨모멘트, 기동은 P-M 상관도의 면적)이 증가할 경우라 할지라도 강성은 오히려 감소하게 되는 경우가 발생하여, 해석 결과 부재력에 따라 큰 단면 성능의 단면으로 설계를 수행한 후 다음 단계의 구조해석에서는 오히려 강성이 감소함으로 인해 상대적으로 작은 부재력이 발생하여 다음 단계의 반복 과정에서는 오히려 단면 성능이 작은 단면으로 설계가 수행되는 등 변동(fluctuation)이 반복되는 수치상 오류가 발생할 수 있다.

이러한 문제점도 단면 성능의 증가가 곧 부재의 강성 증가를 의미하지는 않는 사실에기인한 것으로 판단된다. 따라서 구조해석시 일반적으로 고려하는 콘크리트만의 단면을 토대로 부재의 강성을 고려하기보다는 콘크리트와 철근을 모두 고려하여 휨강성(EI_m)과 축방향 강성(EA_m)을 산정한 후 구조해석을 수행하여 그에 따라 분포된 부재력을 기준으로 구조설계를 수행하는 것이 보다 정확한 설계 과정이 될 것으로 판단된다. 그러나 앞에서 전술한 바와 같이 부재의 단면 성능 순서로 배열된 단면 번호(N)가 증가한다 할지라도 강성의 증가가 비례적으로 발생하지 않을 수 있다(그림 6 참조). 따라서 단면의 강성이 단조증가하지 않음으로 인해 구조해석시 발생하는 반복 계산에 따른 변동을 제어할 필요가 있다. 이러한 배경에서 단면 번호에 따른 강성(EI_m, EA_m)으로부터 회귀분석을 통해 강성의 단조증가 특성을 나타내는 EI_r 과 EA_r 을 각각 결정할 필요가 있다(그림 6 참조). 휨강성과 축방향 강성을 단면 번호에 비례하는 형태로 구성하여(EI_r 과 EA_r) 연속해 결정 과정에서 사용함으로써 강성 변화에 따른 변동성을 일차적으로 제거하는 동시에 불연속해의 결정 과정에서 실

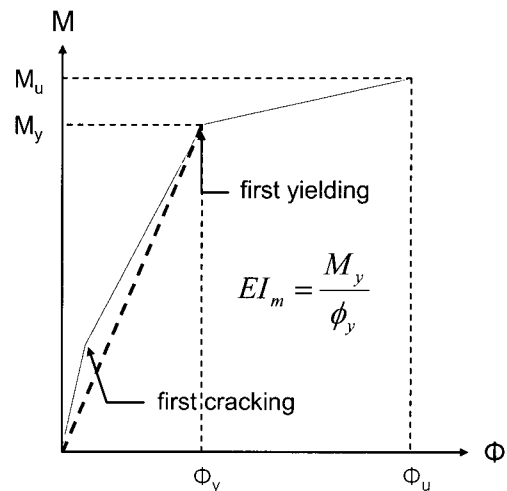
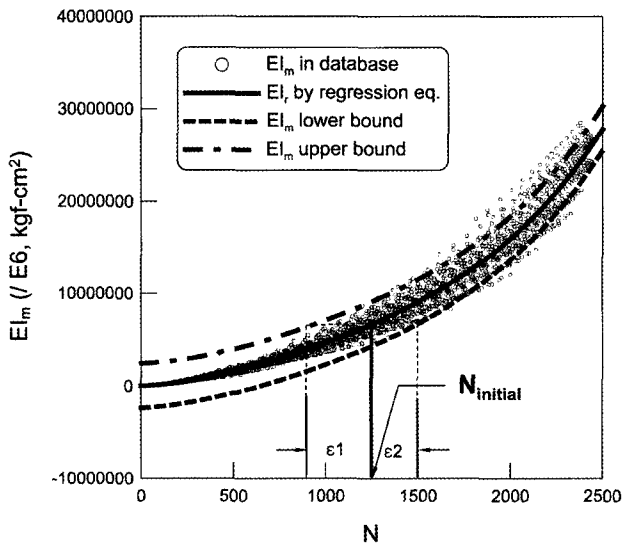
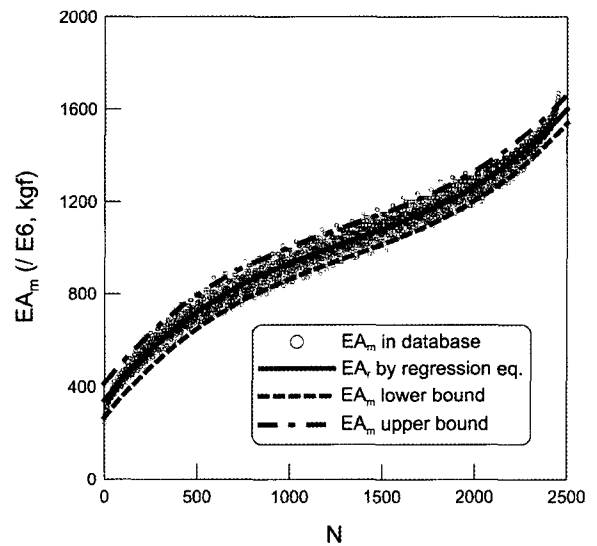


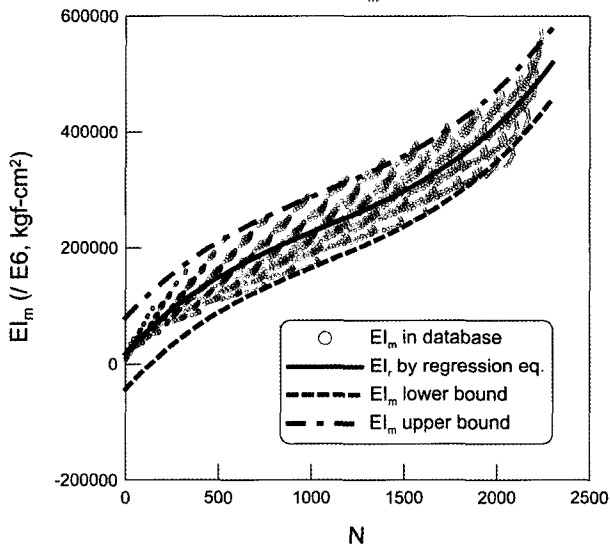
그림 5 이상화된 모멘트-곡률 관계



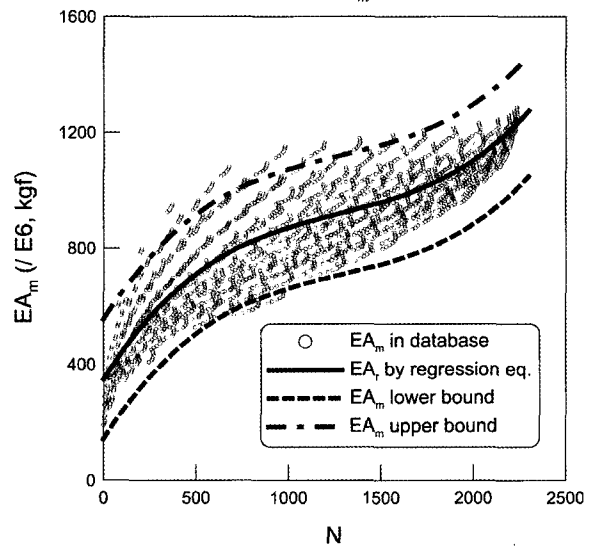
(a) 기둥의 EI_m



(b) 기둥의 EA_m



(c) 보의 EI_m



(d) 보의 EA_m

그림 6 부재의 단면 번호에 따른 강성의 분포

제의 강성(EI_m 과 EA_m)을 사용함으로써 반복 해석 및 설계 과정이 일관성 있게 진행되도록 하였다.

특히 콘크리트와 철근을 모두 고려한 RC 부재의 휨강성과 축방향 강성은 모멘트-곡률 관계를 토대로 산정한다. 그림 5에서와 같이 휨에 대한 성질을 대표하는 보 단면에 대한 모멘트-곡률 관계는 인장철근의 항복에 따라 세 구간으로 이상화하여 나타낼 수 있다.

따라서 구성된 단면 데이터베이스를 통해 산정된 각 단면의 모멘트-곡률 관계로부터 균열이 발생한 이후 인장철근의 항복에 이르기까지의 구간인 두 번째 구간에서의 모멘트-곡률 관계의 기울기를 이용하여 수정된(modified) 휨강성 EI_m 을 산정할 수 있다(Park, 1975). 나아가 수정된 축력에 대한 강성 $EA_m = \bar{E}_c \times (B \times H - (A_s + A_s')) + E_s \times (A_s + A_s')$ 로 산

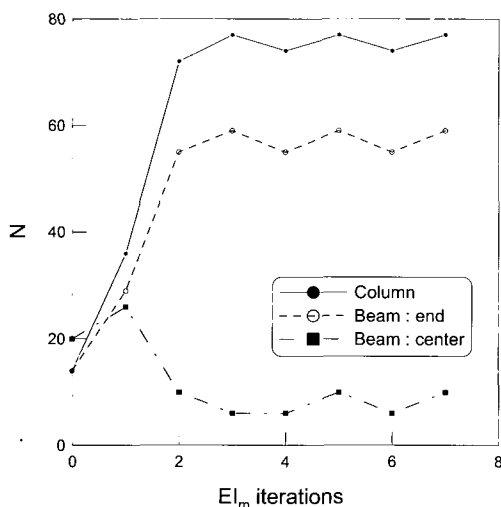
정한다. 여기서, E_c , B 와 H 는 각각 콘크리트 탄성계수, 단면의 폭과 높이를 의미한다. 전술한 바와 같이 단면 번호에 따른 강성의 변화를 회귀분석하여 그래프와 수식으로 나타낼 수 있다.

특히 그림 6의 기둥과 보의 강성 분포 그래프에서 실선은 회귀분석에 의해 구성된 식인 EI_m 을 나타내고 1점쇄선은 EI_m 분포의 상한선을, 파선은 하한선을 나타내고 있어, 그림 6(a)에서와 같이 회귀분석식에 의한 EI_m 을 기준으로 실제 EI_m 값이 어느 정도의 분포폭 내에 존재하는가를 추정할 수 있는 기준이 된다.

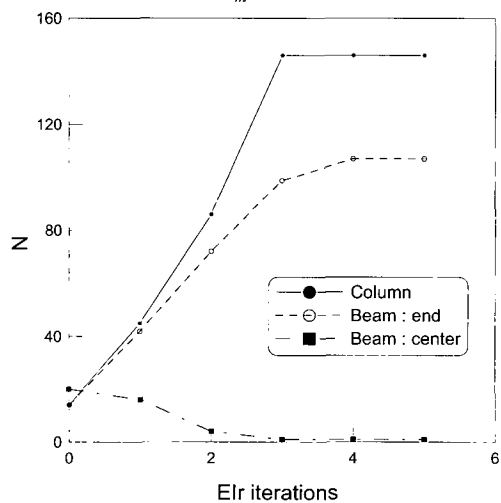
이와 같이 산정한 EI_m 및 EA_m 을 이용하여 1bay-1 floor 프레임 구조물에 대해 구조해석을 수행하고 이에 따라 최적설계를 수행하는 반복 과정에서 해의 변동을 살펴보면 다음과 같다. 작용 하중으로는 보를 4개의 요소로 분할하고

표 4 강성의 회귀분석식

구성 부재	강성의 회귀분석식
기둥	$EI_r / 10^6 = 9.3 \times 10^{-7} N^4 - 0.0031 N^3 + 6.0906 N^2 + 727.65 N + 38871$ (7)
	$EI_{m,lower} / 10^6 = 8.7 \times 10^{-7} N^4 - 0.0029 N^3 + 5.7791 N^2 + 902.22 N - 2.37 \times 10^6$ (8)
	$EI_{m,upper} / 10^6 = 9.7 \times 10^{-7} N^4 - 0.0033 N^3 + 6.4020 N^2 + 553.08 N + 2.45 \times 10^6$ (9)
	$EA_r / 10^6 = 1.4 \times 10^{-7} N^3 - 0.00055 N^2 + 1.0044 N + 339.6$ (10)
	$EA_{m,lower} / 10^6 = 1.4 \times 10^{-7} N^3 - 0.00055 N^2 + 1.01 N + 265.05$ (11)
	$EA_{m,upper} / 10^6 = 1.4 \times 10^{-7} N^3 - 0.00055 N^2 + 1.00 N + 414.14$ (12)
보	$EI_r / 10^6 = 6.37 \times 10^{-5} N^3 - 0.2034 N^2 + 348.78 N + 17772$ (13)
	$EI_{m,lower} / 10^6 = 6.37 \times 10^{-5} N^3 - 0.204 N^2 + 349.59 N - 43579$ (14)
	$EI_{m,upper} / 10^6 = 6.37 \times 10^{-5} N^3 - 0.203 N^2 + 347.98 N + 79123$ (15)
	$EA_r / 10^6 = 1.75 \times 10^{-7} N^3 - 0.00067 N^2 + 1.0185 N + 347.39$ (16)
	$EA_{m,lower} / 10^6 = 1.75 \times 10^{-7} N^3 - 0.000675 N^2 + 1.0212 N + 140.75$ (17)
	$EA_{m,upper} / 10^6 = 1.75 \times 10^{-7} N^3 - 0.000672 N^2 + 1.0158 N + 554.04$ (18)



(a) EI_m 반복 과정



(b) EI_r 반복 과정

그림 7 EI_m 및 EI_r 을 이용한 구조해석에 따른 해의 변동 과정

양 끝 절점에 1000kN, 내부 절점에 72.8kN의 집중하중을 재하하였으며, 콘크리트의 압축강도는 26.5MPa, 기둥의 철근 직경은 D25, 보에 대해서는 직경 D22를 적용하여 설계하고 이 때 철근의 항복강도는 392MPa이다.

그림 7(a)에서와 같이 EI_m 을 이용하여 구조해석을 수행하고 이에 따라 최적설계를 수행하는 경우 반복 횟수가 증가함에 따라 해가 일정한 값으로 수렴하지 않고 일정 범위 내에서 변동하는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 구조물에 대해 회귀분석식에 따른 EI_r 을 이용하여 최적설계를 수행한 결과 그림 7(b)에서와 같이 해가 바로 수렴해가는 것을 알 수 있다. 이는 EI_m 값의 분포가 그림 6에서와 같이 유사한 값에 대해 여러 N값을 가지므로 각 반복 단계의 해석 결과 도출되는 유사한 부재력 범위에서 최적해 N값이 여러 가지로 변동하게 되는 반면 EI_r 은 N에 대해 1:1 대응하는 회귀 분석식으로 나타내어지므로 이와 같은 변동 요인이 제거되어 빠르게 수렴한 것으로 판단할 수 있다.

이 때 EI_r 을 이용하는 경우 해의 수렴성은 좋아지는 장점이 있으나 회귀분석식에 의한 강성값이 실제의 단면 강성값과 다르므로 인해 선택된 최종해에 대한 신뢰도가 떨어지므로, 1차 연속해를 결정하는 과정에서 EI_r 을 도입한 후 최종해 결정을 위한 검색 단계에서는 EI_m 을 이용함으로써 이러한 단점을 보완할 수 있다.

4. 불연속해의 결정

기둥 단면의 성능 최적화를 위한 과정은 다음과 같이 연속

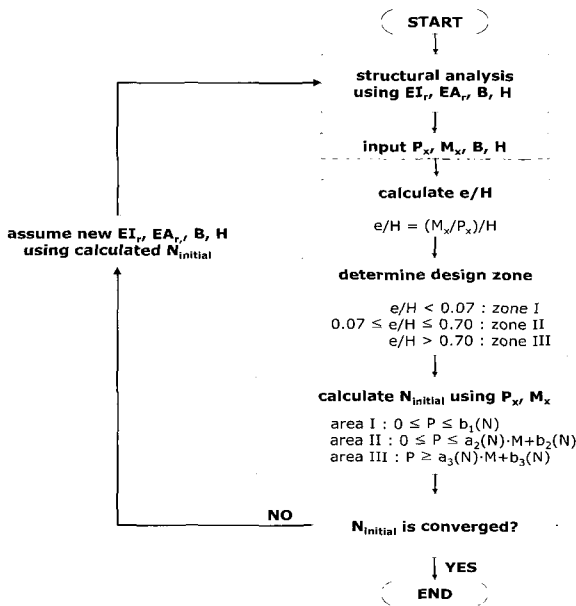
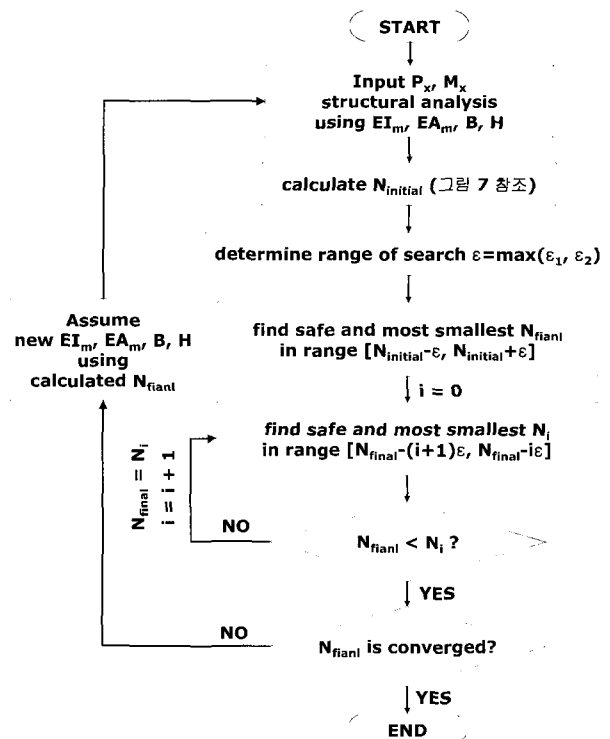


그림 8 성능 최적화에서 기둥의 연속해 $N_{initial}$ 결정을 위한 최적 설계 알고리즘

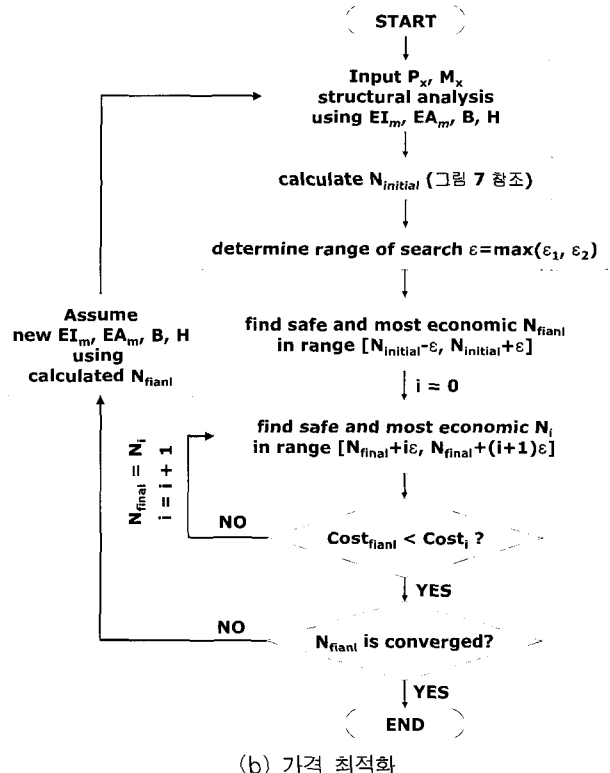
해인 $N_{initial}$ 을 결정하기 위해 EI_r , EA_r 을 이용한 1차 해석 및 최적설계를 위한 반복 과정과 불연속 최종해 N_{final} 을 결정하기 위한 EI_m , EA_m 을 이용한 2차 반복 과정으로 구분되며, 이 중 1차 반복 과정의 흐름도는 그림 8 성능 최적화에서 기둥의 연속해 $N_{initial}$ 결정을 위한 최적 설계 알고리즘과 같다.

연속해 $N_{initial}$ 이 결정되면 $N_{initial}$ 단면에 대한 재원을 토대로 불연속 최적해 결정 과정에서 해석 모델을 새로이 구성한 후 휨강성 및 축방향 강성값으로 단면 데이터베이스에 내장된 실제의 강성인 EI_m 과 EA_m 을 이용하여 구조해석을 수행한다. 이 때 EI_r 과 EA_r 을 토대로 설정된 강성값과 동일한 값을 갖는 EI_m 및 EA_m 분포의 상하한선을 이용하여 그림 6(a)와 같이 해의 검색 영역인 단면 번호 N 의 영역을 결정한다. 즉, 기둥은 EI 와 EA 의 상·하한선을 중심으로, 보는 EI 의 상·하한선을 중심으로 그 검색 영역 $\epsilon = \max(\epsilon_1, \epsilon_2)$ 을 각각 결정한다.

최종해 결정 과정의 흐름도는 그림 9(a)와 같으며, 그림 8과 중복되는 수행 부분은 간략하게 나타내었다. 성능 최적화의 경우 초기해인 $N_{initial}$ 결정 후 앞에서 결정된 검색 영역에서 주어진 부재력을 만족하면서 가장 작은 단면 성능을 가진 N_{final} 을 결정하고, 그 다음 단계로 보다 단면 성능이 작은 영역에서도 주어진 부재력을 만족하는 해가 있을 경우 그 해를 N_{final} 로 선정하기 위해 전체 구간을 검색 구간 ϵ 에 따라 분할하여 순차적으로 각 영역별로 가장 작은 단면 성능의 안전한 해를 추출하여 이를 현재의 최종해와 비교하는 과정



(a) 성능 최적화



(b) 가격 최적화

그림 9 N_{final} 결정을 위한 최적 설계 알고리즘

을 거치게 된다. 일반적으로 단면 번호가 작아져 단면 성능인 P-M 상관도의 면적이 감소할 경우 주어진 부재력을 만족하지 못할 가능성이 크므로 처음 선정된 최종해의 변동이 거의 없을 것으로 예상된다. 축력과 모멘트에 동시에 저항하는

부재인 기둥의 경우 P-M 상관도의 면적은 작아지더라도 그 형상에 따라 주어진 부재력이 안전한 영역에 존재할 수 있어 최종해 선정을 위한 검토를 수행하고 이를 통해 선택된 N_{final} 에 대한 신뢰도를 높일 수 있다.

가격 최적화의 경우 전반적인 설계 흐름은 성능 최적화와 동일하며, 최종해를 직접 검색하는 과정에서 단면 성능이 최소가 아닌 단면 가격이 최소인 해를 찾게 된다는 점에서 차이를 보인다. 최종해 검색을 위한 최적설계의 흐름도를 그림 9(b)에 나타내었다. 성능 최적화의 경우와 차이를 보이는 최종해 검색 단계에서, 안전하면서도 보다 작은 성능을 갖는 단면 검색을 위해 단면 번호가 작아지는 방향으로 검색을 수행했던 성능 최적화와 반대로 단면 번호가 커지는 방향, 즉 단면 성능이 커지는 방향으로 안전하면서도 보다 경제적인 최종해가 존재하는지를 검색 구간에 따라 분할된 각 영역에서 검토하여 현재의 최종해 $N_{initial}$ 과 비교하는 과정을 거친다. 이 때 그림 9(b)에는 나타나지 않았으나 단면 성능이 작아지는 방향으로도 검색을 수행하여 안전하면서도 보다 경제적인 최종해의 존재 여부를 검토해 주어야 한다.

특히 철근콘크리트 구조물의 최적설계에서 가격 최적화를 수행하는 것이 일반적이나 실무에서는 엔지니어가 대상 설계 단면의 가격을 고려하여 설계를 수행하는 것이 불가능하며, 구조해석 결과로 얻어진 부재력에 대해 특히 프레임 등 건축 구조물의 특성상 단면을 최대한 작게 하여 층고 등 내부 공간을 확보하려는 목적에서 가격 최적화보다는 단면 성능의 최적화에 가까운 설계를 수행하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 단면 성능 및 가격 최적화를 모두 수행하여 비교·검토를 수행하였다.

보에서의 성능 최적화 및 가격 최적화 모두 기둥에서의 최적설계 과정과 동일하며, 보 부재 설계 특성상 적용되는 실무상의 제한 조건에 따라 다음 두 가지 사항을 고려하여 최적설계를 수행한다: (1) 보의 단부와 중앙부의 휨모멘트를 토대로 두 영역에 대해 각각 설계를 수행한다, (2) 일반적으로 휨모멘트가 상대적으로 크게 발생하는 단부에 대한 설계를 마친 후 단부의 콘크리트 단면 치수인 폭(B)과 춤(H)이 결정되면, 동일한 치수의 설계 단면을 데이터베이스로부터 추출하여 중앙부 설계를 위한 부(sub) 데이터베이스를 작성하고 이로부터 최적설계를 수행한다. 보 부재의 단부와 중앙부에 대해 기둥 부재에서와 마찬가지로 회귀분석식 (6)을 이용하여 해석 및 설계의 반복 과정을 통해 결정된 연속 초기해 $N_{initial}$ 을 결정하고, 이를 토대로 산정된 검색 영역에서의 직접탐색을 통해 성능 및 가격최적화의 목적에 각기 부합하는 불연속 최종해 N_{final} 을 결정한다. 해석 및 설계의 전체 과정은 보에 부합하는 산정식을 이용하여 기둥에 대한 최적화

알고리즘의 흐름도인 그림 8, 그림 9과 동일한 방식으로 진행한다.

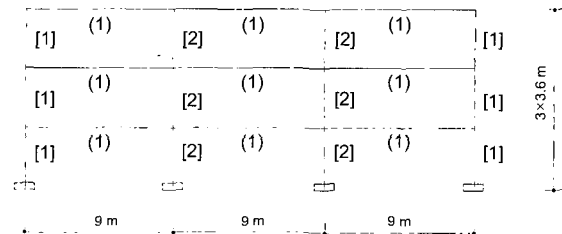
5. 최적설계

5.1 3bay - 3floor 프레임 구조물

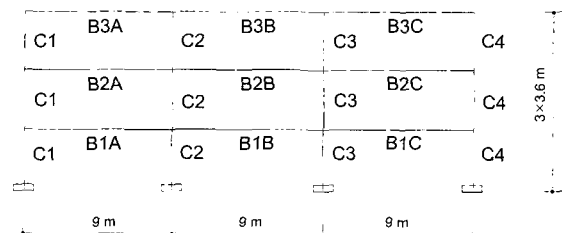
제안된 최적화 기법의 효율성을 검토하기 위해 이전 연구에서 인용된 예제 구조물에 대한 최적설계를 수행하고 그 결과를 비교하였다. 대상 예제는 Lee와 Ahn(2003)이 제안한 Genetic Algorithm에 기반하여 데이터베이스로부터 최적해를 검색하는 연구에서 이용된 3bay - 3floor 프레임 구조물이다. 작용 하중은 16.5kN/m의 고정하중과 7.2kN/m의 활하중이며, 각각 1.4, 1.7의 하중 계수를 적용하였다.

인용된 논문에서는 유사한 발생 부재력이 예상되는 부재들을 그룹으로 묶어 설계를 수행하였으며, 보의 경우 단부와 중앙부의 구별이 없이 동일한 단면으로 설계하였다. 설계에 이용된 콘크리트의 압축강도는 23.5MPa, 철근의 항복강도가 392MPa이며, 철근 직경은 기둥에 대해서 D25, 보에 D22를 사용하였다. 대상 구조물에 대해 이 논문에서 제안한 최적설계 알고리즘에 기반한 가격 최적화 수행 결과를 인용 연구의 최종해와 비교하여 표 5과 표 6에 나타내었다.

표 5의 양 최적설계 결과로부터 기둥의 경우 내부 기둥인 C2, C3는 동일한 설계 결과를 보이고 외부 기둥인 C1, C4는 이 논문의 결과가 다소 보수적인 설계 결과를 도출하고 있음을 알 수 있으며, 보의 경우 표 6에서와 같이 Lee와 Ahn의 설계 결과가 다소 보수적인 결과를 도출하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 반복되는 구조해석 과정에서 각 단계



(a) 인용 논문에서의 부재 분류



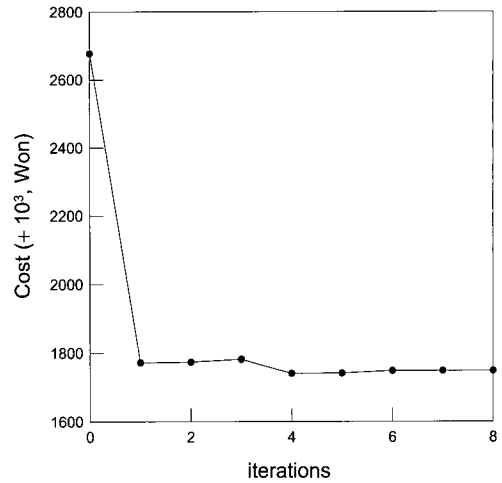
(b) 이 논문에서의 부재 분류
그림 10 3bay - 3floor 프레임

표 5 3bay - 3floor 프레임 기둥 최종 설계 결과 비교

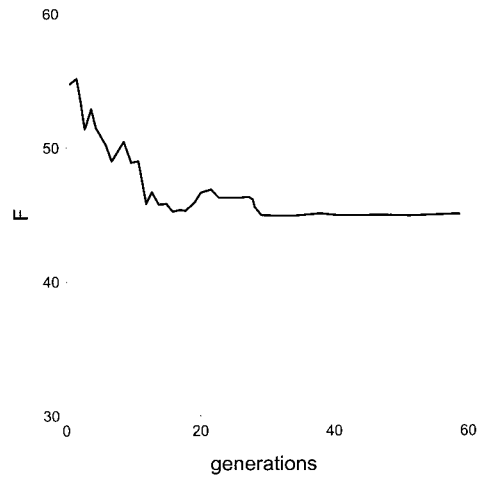
기둥	층	N _{final} (This Study)			N _{ref} (Lee and Ahn)		
		B (mm)	H (mm)	철근 개수	B (mm)	H (mm)	철근 개수
C1	1	300	300	4	300	300	6
	2	300	300	8	300	300	6
	3	300	350	14	300	300	6
C2	1	300	300	4	300	300	4
	2	300	300	4	300	300	4
	3	300	300	4	300	300	4
C3	1	300	300	4	300	300	4
	2	300	300	4	300	300	4
	3	300	300	4	300	300	4
C4	1	300	300	4	300	300	6
	2	300	300	8	300	300	6
	3	300	350	14	300	300	6

마다 가정된 부재 단면에 따라 부재력이 분포함으로 인해 발생한 차이로, 이 논문의 경우 보에 비해 기둥에 부재력이 더 많이 분포되는 양상으로 구조해석이 수행되고 Lee와 Ahn의 경우 그 반대의 경향을 나타내도록 구조해석이 수행된 결과임을 추측할 수 있다.

다음으로 가격을 비교하여 보면, Lee와 Ahn의 연구에서 기둥의 최종해인 단면 번호 N_{ref}가 0과 1인 설계 단면은 각각 이 논문에 이용된 데이터베이스 내의 단면 번호 N의 1과 3에 해당하며, 비교를 위해 이 논문에서 이용한 재료의 가격으로 산정한 단면 가격은 두 설계 단면이 거의 동일한 12.55천원/m이다. 또한 보의 최종해인 N_{ref}가 40인 설계



(a) 이 논문에서 가격의 수렴 양상



(b) 인용 연구에서 목적 함수의 수렴 양상

그림 11 반복 최적설계에 따른 목적 함수의 수렴 양상 비교

단면은 본 연구에서의 단면 번호 109에 해당하고 가격은 18.86천원/m이다. 따라서 인용된 연구에서의 최종 설계 가

표 6 3bay - 3floor 프레임 보 최종 설계 결과 비교

보	N _{final} (This Study)						N _{ref} (Lee and Ahn)		
	END			CENTER			END/CENTER		
	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)
B1A	250	450	5/2	250	450	4/2	300	550	5/3
B1B	250	450	5/2	250	450	3/2	300	550	5/3
B1C	250	450	5/2	250	450	4/2	300	550	5/3
B2A	250	450	5/2	250	450	3/2	300	550	5/3
B2B	200	500	4/2	200	500	3/2	300	550	5/3
B2C	250	450	5/2	250	450	3/2	300	550	5/3
B3A	250	450	5/2	250	450	3/2	300	550	5/3
B3B	200	500	4/3	200	500	3/2	300	550	5/3
B3C	250	450	5/2	250	450	3/2	300	550	5/3

격은 2070천원으로, 본 연구에서 산정된 최종 설계 가격인 1749천원에 비해 18% 정도 더 높은 가격으로 산정되었음을 확인할 수 있다. 이는 보에서 단부와 중앙부를 구분하여 설계하지 않고 동일한 설계 단면을 적용하기 위해 실제 발생 부재력에 비해 보수적으로 설계를 수행하였으며, 기둥 또한 층에 따라 다른 설계 결과를 적용하지 않고 동일한 설계 단면을 적용한 데서 가격이 높게 산정된 것으로 판단할 수 있다.

수렴 속도 면에서는 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 지닌다. Genetic Algorithm에 따른 대상 구조물의 가격 최적화에서의 해의 수렴 양상을 보이면 다음과 같다. 그림 11(a)에서 이 논문의 각 1회의 반복 단계는 1회의 구조 해석 및 설계 단계를 나타낸다. 그림 11(b)에서 F는 초기 가정된 구조물의 가격에 대비하여 최적설계에 따른 구조물의 가격의 비로 나타낸 수렴도를 표현하는 목적함수이며, generations는 해의 선정 과정의 각 단계를 나타내는 것으로 본 연구에서의 반복 횟수와 동일한 의미를 가진다. 본 예제의 경우 Genetic Algorithm에 따른 최적설계시 수렴 속도가 상대적으로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

5.2 2bay - 6floor 프레임 구조물

성능최적화 및 가격최적화에 따른 설계의 차이를 살펴보기 위하여 다음 예제 구조물을 가정하고 최적설계를 수행하였다. 그림 12(a)에서 평면 상에 작용하는 고정하중은 360kgf/m^2 , 활하중은 250kgf/m^2 을 가정하였으며 각각 1.4, 1.7의 하중계수를 적용하였다. 그림 12(a)의 A - A 단면에 대응하는 그림 12(b)의 구조물에 대하여 성능 및 가격 최적화를 수행하며, 기둥 설계를 위해 콘크리트 압축강도 26.5MPa , 철근 직경 D25, 보 설계를 위한 콘크리트 압축강도 23.5MPa , 철근 직경 D22를 적용하였고 철근의 항복강도는 392MPa 이다.

가. 성능 최적화

기둥과 보의 성능 최적설계 결과를 표 7과 표 8에 정리하였다. 표 7의 기둥 철근 개수에서 'BS/HS/CS'라고 표기된 것은 폭/측면/모서리에 배근된 철근의 개수를 나타내며, 초기 가정 단면은 기둥의 경우 C1, C3는 단면 번호 83에 해당하는 치수 $400 \times 400\text{m}^2$, 철근 개수 2/0/4에 해당하는 단면을, C2는 단면 번호 108인 치수 $450 \times 450\text{m}^2$, 철근 개수 0/0/4인 단면으로 가정하였다. 보의 경우 표 8의 철근 개수에서 인장철근과 압축철근 개수를 TS/CS로 표기하였으

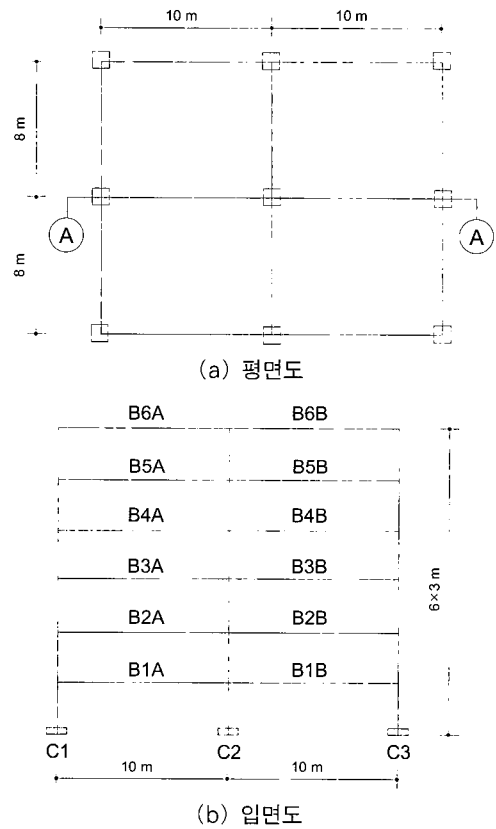


그림 12 2bay - 6floor 프레임 개요

며, 초기 가정 단면은 모두 동일하게 82번에 해당하는 치수 $400 \times 600\text{m}^2$, 철근 개수 4/3인 단면을 적용하였다.

임의의 i 번째 반복 단계에서의 성능 수렴도는 식 (19)와 같이 평가하며, $Capa_c$ 로 나타내어지는 기둥의 성능은 P-M 상관도의 면적으로 평가하며, 보의 성능인 $Capa_b$ 는 저항 모멘트를 나타낸다.

$$Conv_i(\%) = \frac{\sum_1^{N_c} \left| \frac{Capa_{c,i} - Capa_{c,i-1}}{Capa_{c,i-1}} \right| \times 100 + \sum_1^{N_b} \left| \frac{Capa_{b,i} - Capa_{b,i-1}}{Capa_{b,i-1}} \right| \times 100}{N_c + N_b} \quad (19)$$

표 7에서 축력이 가장 많이 작용하는 내부 기둥의 저층(1~3층)에서는 초기해에 비해 최종해가 보다 큰 단면 성능의 설계 단면으로 선택되고, 외부 기둥의 맨 꼭대기층인 6층 기둥 부재는 다른 층에서와 달리 보로부터 전달되는 부재력을 상부층 기둥으로 분배하지 못하므로 보다 큰 단면 성능을 갖도록 설계되며, 그 외 나머지 기둥 부재에서는 대체적으로 동일한 단면으로 초기해보다 작은 단면 성능의 설계 단면으로 설계되었음을 알 수 있다. 이때 외부 기둥의 2층 기둥이

표 7 2bay-6floor 프레임 기둥의 성능 최적화

기둥	층	초기 가정 단면			N _{initial} (연속해)			N _{final} (불연속해)		
		B (mm)	H (mm)	철근 개수 (BS/HS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (BS/HS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (BS/HS/CS)
C1 = C3	1	400	400	2/0/4	350	400	1/1/4	350	350	0/2/4
	2	400	400	2/0/4	300	400	1/2/4	300	450	0/2/4
	3	400	400	2/0/4	300	350	1/0/4	300	400	0/0/4
	4	400	400	2/0/4	300	350	0/0/4	300	350	0/2/4
	5	400	400	2/0/4	300	300	0/0/4	300	300	0/0/4
	6	400	400	2/0/4	400	450	0/0/4	300	400	2/0/4
C2	1	450	450	0/0/4	400	550	2/3/4	350	450	4/6/4
	2	450	450	0/0/4	450	450	0/5/4	400	450	0/5/4
	3	450	450	0/0/4	300	450	1/2/4	350	350	2/3/4
	4	450	450	0/0/4	300	300	0/0/4	300	300	2/2/4
	5	450	450	0/0/4	300	300	0/0/4	300	300	0/0/4
	6	450	450	0/0/4	300	300	0/0/4	300	300	0/0/4

표 8 2bay-6floor 프레임 보의 성능 최적화

보	초기 가정 단면					
	END			CENTER		
	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)
ALL	400	600	4/3	400	600	4/3
보	N _{initial}					
	END			CENTER		
	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)
B1A, B	250	500	4/2	250	500	3/2
B2A, B	250	500	4/2	250	500	3/2
B3A, B	250	500	4/2	250	500	3/2
B4A, B	250	500	4/2	250	500	3/2
B5A, B	200	500	4/3	200	500	3/2
B6A, B	200	500	4/3	200	500	3/2
보	N _{final}					
	END			CENTER		
	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)
B1A, B	250	450	5/2	250	450	3/2
B2A, B	300	500	4/3	300	500	3/2
B3A, B	250	450	5/2	250	450	3/2
B4A, B	300	450	5/5	300	450	4/2
B5A, B	250	500	4/2	250	500	3/2
B6A, B	250	450	5/2	250	450	3/2

상대적으로 큰 설계 단면으로 결정된 것은 인접한 부재인 보 부재력과 관계로부터 도출된 현상으로, 표 8에서 2층 보 부재의 최종해가 인장철근의 개수가 적어 1층 및 3층의 보

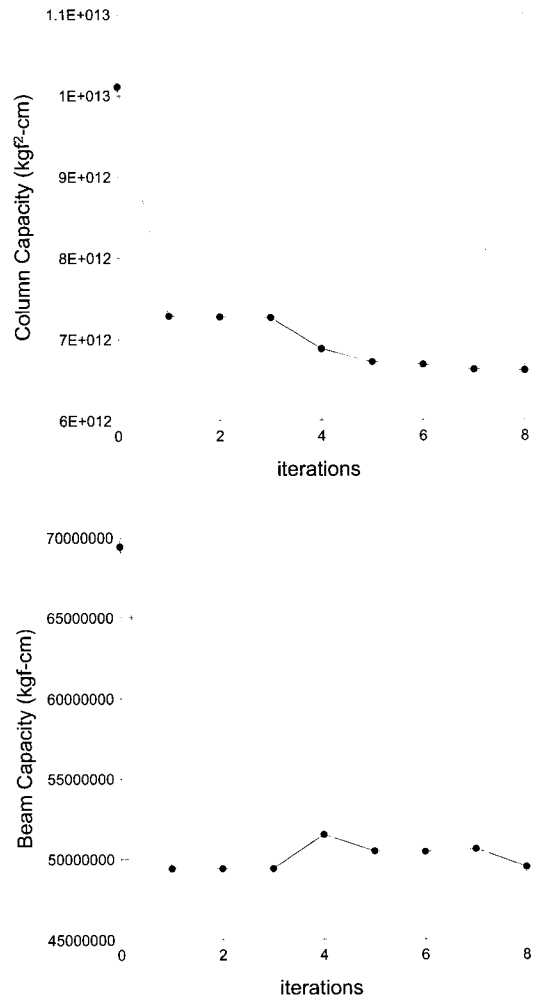


그림 13 반복 최적설계에 따른 기둥과 보의 성능 수렴 양상

부재보다 다소 작은 단면 성능을 가지므로 구조해석시 휨강성에 따라 부재력을 분포시키는 과정에서 인접한 기둥 부재로 보다 큰 부재력을 전달시킴으로써 나타난 결과이다.

보의 경우 그림 13에서와 같이 인접 부재간의 부재력 분포에 따라 기둥 부재가 초기해보다 점차적으로 작은 최종해를 가지도록 수렴해 가는 결과에 따라 초기해보다 점차적으로 큰 최종해로 수렴한 결과를 확인할 수 있다. 반복 횟수 0은 최초 가정 단면을 나타내며, 3회까지가 $N_{initial}$, 그 이후로 8회까지가 N_{final} 검색을 위한 과정을 나타낸다.

나. 가격 최적화

앞에서와 동일한 하중 조건과 구조물에 대해 가격 최적화를 수행하였다. 요구되는 부재력에 가장 근접하는 저항 강도를 가지는 단면보다는 주어진 안전하면서도 가장 경제적인 단면을 최종해로 선택하게 된다.

표 9와 표 10에서 가격 최적화의 경우 성능 최적화의 최종해와비교한 결과 기둥은 상대적으로 보다 작은 단면으로 설계되고 보는 보다 큰 단면으로 설계되었음을 확인할 수 있다. 특히 보의 경우 가격 최적화에서는 가격이 최소인 단면을 검색해가는 과정에서 단면 성능이 요구되는 부재력보다 다소 크더라도 가격에서 경제적이라면 그 해가 선택되므로 부재간의 해의 변동폭이 성능 최적화보다 다소 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 보가 다소 단면 성능이 큰 설계 단면으로 설계됨에 따라 인접 부재인 기둥은 자연히 부재력 분포가 감소하게 되어 성능 최적화에서보다 작은 단면 성능을 가지도록 최적설계가 수행되었다.

표 9 2bay-6floor 프레임 기둥의 가격 최적화

기둥	층	N_{final}		
		B (mm)	H (mm)	철근 개수 (BS/HS/CS)
C1 = C3	1	300	350	1/4/4
	2	300	400	1/4/4
	3	300	300	2/2/4
	4	300	350	2/3/4
	5	300	300	0/0/4
	6	300	350	1/4/4
C2	1	350	350	4/6/4
	2	300	450	2/6/4
	3	300	350	2/4/4
	4	300	300	2/2/4
	5	300	300	0/0/4
	6	300	300	0/0/4

표 10 2bay-6floor 프레임 보의 가격 최적화

보	N_{final}					
	END			CENTER		
	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)	B (mm)	H (mm)	철근 개수 (TS/CS)
B1A	250	450	5/2	250	450	3/2
B1B	250	450	5/2	250	450	3/2
B2A	250	450	5/2	250	450	3/2
B2B	250	450	5/2	250	450	3/2
B3A	250	450	5/2	250	450	3/2
B3B	250	450	5/2	250	450	3/2
B4A	250	450	5/2	250	450	3/2
B4B	250	450	5/2	250	450	3/2
B5A	250	450	5/2	250	450	3/2
B5B	250	450	5/2	250	450	3/2
B6A	250	450	5/2	250	450	3/2
B6B	250	450	5/2	250	450	3/2

이 때 그림 14에서 가격 최적화를 수행한 경우 성능 최적화의 경우에 비해 4.9% 정도의 비용 절감 효과를 거두고 있음을 확인할 수 있으며, 임의의 i 번째 반복 단계에서의 가격 수렴도는 다음과 같이 평가한다.

$$Conv_i(\%) = \frac{\sum_1^{N_c} \left| \frac{Cost_{c,i} - Cost_{c,i-1}}{Cost_{c,i-1}} \right| \times 100 + \sum_1^{N_b} \left| \frac{Cost_{b,i} - Cost_{b,i-1}}{Cost_{b,i-1}} \right| \times 100}{N_c + N_b} \quad (20)$$

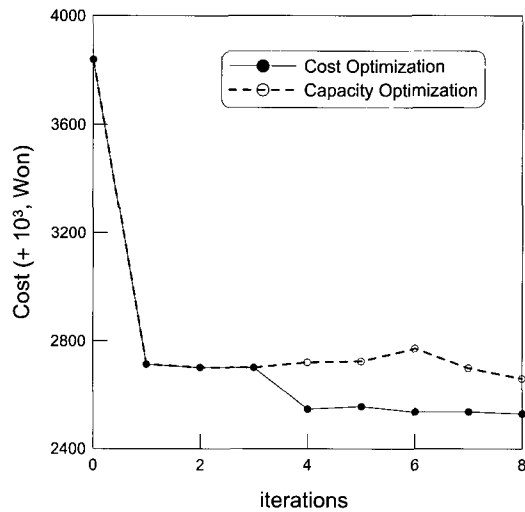


그림 14 성능 및 가격 최적화에서 반복 최적설계에 따른 구조물의 가격 수렴 양상 비교

6. 결 론

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 번호 간의 관계를 회귀분석식으로 구성하여 빠르게 최적해를 검색하는 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 부재의 단면 번호는 구조해석의 주요 인자인 휨강성 및 축방향 강성과 비례하는 분포를 보여 회귀분석식으로 표현 가능하며, 분포폭을 나타내는 상한선과 하한선을 이용하여 회귀분석식으로 결정된 1차 최적해로부터 어느 정도의 인접 영역에 최종 최적해가 분포하는지 여부를 예상할 수 있다. 다음으로 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 있다.

또한 일반적인 설계 실무에서 부재 단면 설계시 성능 최적화에 가까운 설계를 수행한다는 사실로부터 성능 최적화와 실질적인 철근콘크리트 구조물의 최적설계시 목표가 되는 가격 최적화를 모두 수행함으로써 그 결과를 비교·검토할 수 있도록 하였다.

특히 성능 최적화와 가격 최적화 모두 최종해 결정시까지 빠른 수렴 양상을 보이며 수렴도 또한 높다. 특히 타 연구에서 인용된 예제 구조물에 대한 가격 최적화 결과 수렴 속도 뿐 아니라 최종 산정된 가격 면에서 보다 경제적인 설계 결과를 보임을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제 번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

한국콘크리트학회 · 대한건축학회 (1999) 콘크리트구조설계 기준, 건설교통부

한국엔지니어링진흥협회 (2004) 철근콘크리트 구조물의 한계 상태 설계법, 과학기술부

최창근, 곽효경 (1989) 단면 데이터 베이스에 의한 RC 부재의 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 2(1), pp.79~86

American Concrete Institute (2002) *ACI Manual of Concrete Practice Part 3-2002*, ACI international.

Belegundu, A. D., Chandrupatla, T. R. (1999) *Optimization Concepts and Applications in Engineering*,

Prentice Hall.

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.

Chan, C. M., Sherbourne A. N., Grierson, D. E. (1994) Stiffness Optimization Technique for 3D Tall Steel Building Frameworks under Multiple Lateral Loadings, *Engineering Structures*, 16(8), pp.570~576.

Choi, C. K., Kwak, H. G. (1990) Optimum RC Member Design with Predetermined Discrete Sections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116(10), pp.2634~2655.

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.

Kamal, C. S., Adeli, H. (1998) Cost Optimization of Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(5), pp.570~578.

Lee, C., Ahn, J. (2003) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(6), pp.762~774.

Leps, M., Sejnoha, M. (2003) New Approach to Optimization of Reinforced Concrete Beams, *Computers and Structures*, 81(19), pp. 1957-1966.

Nilson, A. H., Darwin, D., Dolan, C. W. (2003) *Design of Concrete Structures*, Mc Graw Hill.

Park, R., Paulay, T. (1975) *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons.

Pezeshk, S., Camp, C. V., Chen, D. (2000) Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(3), pp.382~388.

Rao, S. S. (1996) *Engineering Optimization, Theory and Practice*, John Wiley & Sons.

Rapiq, M. Y., Southcombe, C. (1998) Genetic Algorithms in Optimal Design and Detailing of Reinforced Concrete Biaxial Columns Supported by a Declarative Approach for Capacity Checking, *Computers and Structures*, 69(4), pp.443~457.

Smith, I. M., Griffiths, D. V. (1998) *Programming the Finite Element Method*, John Wiley & Sons.