철근콘크리트 모멘트골조의 비용 및 이산화탄소 배출량을 고려한 유전자알고리즘 기반 구조최적화기법

이 민 석^{1,2} · 홍 갑 표¹ · 최 세 운^{3*}

¹연세대학교 건축공학과, ²대한전기협회 KEPIC처 원자력팀, ³대구가톨릭대학교 건축학부

Genetic Algorithm Based Optimal Structural Design Method for Cost and CO₂ Emissions of Reinforced Concrete Frames

Min-Seok Lee^{1,2}, Kappyo Hong¹ and Se-Woon Choi^{3*}

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

²Nuclear Power Team of Korea Electric Power Industry Code, Korea Electric Association, Seoul, 05718, Korea

³Department of Architecture, Catholic University of Daegu, Gyeongsan, 38430, Korea

Abstract

In this study, the genetic algorithm based optimal structural design method is proposed. The objective functions are to minimize the cost and CO₂ emissions, simultaneously. The cost and CO₂ emissions are calculated based on the cross-sectional dimensions, length, material strength, and reinforcement ratio of beam and column members. Thus, the cost and CO₂ emissions are evaluated by using the amounts of concrete and reinforcement used to construct a building. In this study, the cost and CO₂ emissions calculated at the phases of material transportation, construction, and building operation are excluded. The constraint conditions on the strength of beam and column members and the inter-story drift ratio are considered. The linear static analysis by using OpenSees is automatically conducted in the proposed method. The genetic algorithm is employed to solve the formulated problem. The proposed method is validated by applying it to the 4-story reinforced concrete moment frame example.

Keywords : cost, CO₂ emissions, reinforced concrete moment frame, genetic algorithm

1. 서 론

산업화에 따른 기후 변화 및 자원 고갈로 인한 피해가 전 지구적으로 발생함에 따라 환경 영향을 최소화하고자 하는 관심 및 활동이 활발히 행해지고 있다. 건설 분야는 건설 자재의 채취, 생산, 운반, 시공, 운영, 폐기 등에서 불가피하게 화석연료, 천연자원 등을 사용할 수 밖에서 없으며, 이에 따른 이산화탄소 배출량과 에너지 사용량은 상당히 지구의 온난화 등에 영향을 미치는 대표적인 산업분야로 알려져 있다. 이와 같은 이유로 건설 분야에서 이산화탄소 배출량 혹은 에너지 사용량을 감소시키고자 하는 연구가 수행되어져 왔다.

건물의 전 생애주기 관점에서 볼 때, 가장 많이 이산화

탄소량을 배출시키는 단계는 건물을 완성 후 운용 단계인 것으로 알려져 있다. 냉·난방기기 등을 운용하기 위해 사용되는 연료로부터 발생하는 이산화탄소가 장기간 동안 배출되기 때문이다. 따라서 해당 단계에서는 효율적인 냉·난방기기 개발, 단열성능이 우수한 외장재, 내장재 개발 등을 통해 환경 영향을 감소시키고자 하는 노력이 행해지고 있다.

한편, 건물을 완공하기 전 단계에서는 친환경 건설재료를 개발하거나 환경 부하를 감소시키는 기법을 개발하는 내용으로 연구가 수행되고 있다. Jung과 Yang(2015)은 이산화탄소 배출량을 저감하는 측면에서 보통 포틀랜드 시멘트의 사용량을 감소시키기 위해 고로슬래그, 플라이애시와 같은 산업 부산물을 이용한 배합설계 모델을 제시하였다. Choi 등

* Corresponding author:

Tel: +82-53-850-2736; E-mail: watercloud@cu.ac.kr

Received July 27 2016; Revised September 27 2016;

Accepted September 28 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(2013)은 Steel Reinforced Concrete(SRC) 기둥 단면을 대상으로 한 CO₂ 최적화 기법을 제시하였다. 이는 사용되는 재료의 물량을 기반으로 하여 이산화탄소 배출량을 계산하였으며, 작용하는 하중 크기에 따라 최소의 이산화탄소 배출량을 가지는 SRC 기둥 단면 정보를 제시하였다. 기둥 단면 정보에는 단면 치수와 사용되는 H형강 치수가 있기 때문에 사용되는 콘크리트와 철골 물량을 계산할 수 있다. Yeo와 Gabbai(2011)은 파라미터분석을 통해 철근콘크리트 단위 보에 대한 내재에너지(embodied energy)를 최소화하는 구조 설계방안을 제시하였다. 제시한 기법을 통해 얻은 최적설계안은 비용 측면에서 약 5%정도 증가하지만, 내재에너지 측면에서는 약 10%정도 감소하는 것으로 나타났다. Park 등(2014)은 파라미터분석을 통해 철근콘크리트 단위 기둥에 대하여 강도제약조건을 만족시키면서 비용과 이산화탄소 배출량을 최소화하는 설계안을 얻는 연구를 수행하였다. 이를 통해 철근의 강도와 양을 증가시키는 것이 이산화탄소 배출량을 감소시킬 수 있으며, 반면 콘크리트의 강도와 양(단면 크기)를 증가시키면 비용을 감소시킬 수 있는 것으로 제시하였다. Oh 등(2016)은 concrete-filled steel tube(CFT) 기둥에 대하여 비용과 이산화탄소 배출량을 고려한 최적구조설계기법을 제시하였다. 제시한 기법을 통해 이산화탄소 배출량과 비용을 각각 51.03%, 11.18% 감소된 CFT 기둥 단면 설계안을 얻을 수 있었다. Park 등(2013)은 Steel Reinforced Concrete (SRC) 기둥열의 비용과 이산화탄소 배출량을 최소화하는 구조최적화 기법을 제시하였으며, 이를 35층 주상복합 건물 예제에 적용하였다. 고강도를 가지는 재료를 사용하는 것이 경제적이면서 친환경적인 구조설계안을 제시하는 하는 것으로 나타났다.

일반적으로 건축물을 대상으로 한 구조최적화 연구는 철근콘크리트 구조물(Chan *et al.*, 2004; Kwak and Kim, 2007; Fragiadakis and Papadrakakis, 2008)보다 철골 구조물을 대상으로 한 연구(Choi and Park, 2012; Choi *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2005)가 보다 더 활발하게 수행되어져 왔다. 그 이유는 철골구조물은 일반적으로 사용 H형강을 이용하기 때문에 선택할 수 있는 단면의 종류가 제한적인 반면에, 철근콘크리트는 단면 치수를 자유롭게 선정할 뿐 아니라 철근 개수, 지름, 강도 등을 추가적으로 선택해야 하기 때문이다. 즉, 철근콘크리트의 단면을 정하기 위해서는 철골 단면보다 더 많은 구조 설계 변수가 정해져야 하기 때문이다. 고려해야 하는 변수가 많다는 것은 풀어야 하는 문제가 복잡해지고 경우의 수가 크다는 것을 의미하기 때문에 최적의 설계안을 제시하는 기법을 제시하는 것은 상대적으로 더 어렵고, 많은 가정 및 제한 사항 등을 요구하게 된다.

그러나 친환경적인 구조설계기법을 개발하고자 하는 연구에서는 철골구조물보다 철근콘크리트에 초점을 맞추어 수행된 경향이 있다. 그 이유는 철골구조물은 일반적으로 단일 재료로만 이루어지기 때문에 구조물량을 줄이면 비용뿐 아니라 이산화탄소 배출량을 동시에 감소시키는 효과를 기대할 수 있다. 반면, 철근콘크리트는 콘크리트와 철근이라는 이질 재료의 조합으로 이루어지고, 이들의 조합 비율에 따라 동일한 부재 강도를 가지게 하는 방법이 다양하게 가능하기 때문에 이산화탄소 배출량을 최소화하는 구조설계안을 찾기가 어렵다.

철근콘크리트 구조는 건설 분야에서 차지하는 비중이 상당히 크기 때문에, 친환경적인 건설을 실현하기 위해서는 콘크리트와 철근 중 어느 재료의 물량을 감소시키는 것이 이산화탄소 배출량을 감소시키는데 효율적인지 분석되어질 필요가 있다. 철근콘크리트 구조의 친환경적 구조설계기법 개발에 관한 기존 연구들(Yeo and Gabbai, 2011; Park *et al.*, 2014)은 대부분 단일 부재에 대한 최적구조안을 찾는데 국한되었다. 그러나 일반적으로 철근콘크리트 건물은 높은 부정정 구조물이기 때문에 부재 간의 상호작용을 무시할 수 없다. 따라서 철근콘크리트 건물에 대해 환경성을 고려한 최적설계기법 개발이 필요하다고 판단된다.

한편, 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)은 미분이 필요 없으며, 구현이 용이하기 때문에 다양한 분야에서 정식화된 최적화 문제의 해를 찾는데 적용되어져 왔다(Farhat *et al.*, 2009; Nimitawat and Nanakorn, 2009; Xu *et al.*, 2015).

본 연구에서는 철근콘크리트 건물에 대한 유전자 알고리즘 기반의 최적구조설계기법을 제시하고자 한다. 목적함수는 구조물의 비용과 이산화탄소 배출량을 동시에 각각 최소화하는 것이다. 비용 및 이산화탄소 배출량은 구조설계안에서 얻을 수 있는 단면치수, 부재길이, 재료강도, 철근량 등과 같은 설계정보를 통해 계산한다. 즉, 구조물의 물량을 기초로 하여 비용과 이산화탄소 배출량을 평가한다. 재료의 운반, 시공 및 건물 운영 단계에서 발생하는 비용 및 이산화탄소 배출량은 본 연구에서 제외한다. 제약조건은 철근콘크리트 건물을 구성하는 기둥과 보 부재의 강도조건과 층간변위조건이 고려된다. 제약조건을 평가하기 위해 OpenSees를 활용한 선형정적해석이 수행된다. 제약조건을 만족시키면서 목적함수에 대해 최소의 값을 제시하는 설계안을 찾기 위해 유전자 알고리즘이 사용된다. 제시한 알고리즘의 적용성을 검증하기 위해 4층 철근콘크리트 모멘트 골조 예제에 제시하는 기법을 적용하여 검증한다.

2. 철근콘크리트 부재의 강도설계

건축부재의 구조설계는 구조부재에 작용하는 소요강도보다

부재의 설계강도가 크도록 설계하는 것이 원칙이다. 소요 강도는 가정된 하중 및 하중조합에 대하여 구조해석 등을 수행하여 얻게 되는 부재에 최대 전달되는 부재력을 의미하며, 설계강도는 부재의 치수 및 형상, 재료 강도, 철근비 등을 통해 결정되는 부재의 최대 저항능력을 의미한다.

철근콘크리트 구조물에서 일반적으로 보는 휨과 전단에 대해서 강도검토가 이루어지며, 기둥은 전단, 축력-휨모멘트 상관도에 대해서 강도검토가 이루어진다. 보는 축력의 영향이 미비하기 때문에 휨모멘트와 전단에 대하여 각각 검토되지만, 기둥은 일반적으로 축력과 휨모멘트가 동시 전달되어 상호작용 (axial force and moment interaction diagram)을 일으키기 때문에 이에 대한 영향을 고려하여 강도검토가 이루어진다.

ACI 318-08에서 제시하고 있는 강도설계식을 정리하면

Table 1 Structural design equations for RC beams and columns(ACI 318-08)

Moment	<p>Moment strength constraint</p> $M_u \leq \phi M_n$ $M_n = A_s' f_y (d - d') + (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$ $a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_{ck} b}$ <p>Maximum tension reinforcement</p> $A_s - A_s' = A_{st}$ $\leq \max \left(\frac{3 d_t \beta (0.85) f_{ck} b}{7 f_y}, \frac{(0.003) d_t (0.85) f_{ck} b}{(2 \epsilon_y + 0.003) f_y} \right)$ <p>Minimum reinforcement constraint</p> $A_{s, \min} = \frac{0.25 \sqrt{f_c'} b_w d}{f_y} \geq \frac{1.4 b_w}{f_y}$
Shear	<p>Shear strength constraint</p> $V_u \leq \phi V_n$ $V_n = V_c + V_s$ $V_c = \begin{cases} 0.17 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \\ \left(0.16 \lambda \sqrt{f_c'} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_n} \right) b_w d \leq 0.29 \lambda \sqrt{f_{ck}} b_w d \\ 0.29 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \frac{0.29 N_u}{A_g}} \\ \left(0.05 \lambda \sqrt{f_c'} + 4.8 \frac{V_u d_p}{M_u} \right) b_w d \end{cases}$ $V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}$
Axial force and moment interaction diagram	<p>$P_n = 0.8 [0.85 f_{ck} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$</p>

Table 1과 같다. 축력과 휨모멘트에 대한 부재설계 강도는 콘크리트와 주근의 기여를 고려하여 계산한다. 주근의 강도 기여가 고려되기 때문에 주근의 양에 따라 부재 강도가 달라진다. 그러나 주근의 양은 부재의 파괴거동에도 영향을 미치기 때문에 철근의 양(비율)은 상대적으로 제한되어 일정 수준 범위 내에서 배근되어야 한다. 한편, 부재의 설계전단 강도는 콘크리트와 전단보강근의 기여를 고려하여 계산되며, 소요전단강도 (V_u)와 콘크리트의 전단강도 기여도 (V_c)의 상대적 비율에 따라 철근에 의한 전단보강 여부 및 보강량이 결정된다. 전단보강이 필요한 경우, 소요전단강도와 콘크리트의 전단강도 기여도의 차이보다 전단보강근의 전단강도 기여도 (V_s)가 크도록 전단보강근의 배근 간격(s)을 결정하게 된다.

3. 구조정식화 및 최적구조설계기법

3.1 구조정식화

본 논문에서 두 가지의 목적함수를 사용한다. 첫 번째 목적함수는 경제성을 고려하기 위해서 RC 모멘트골조의 구조 비용을 최소화하는 것이며, 두 번째 목적함수는 환경성을 고려하기 위해서 RC 모멘트골조를 구성하는 구조재료에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 최소화하는 것이다. 이들은 식 (1)과 (2)에 나타난 것처럼 사용되어지는 콘크리트와 철근의 양에 근거하여 계산되어진다.

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{i=1}^n (C_i^{\text{conc}} W_i^{\text{conc}} + C_i^{\text{steel}} W_i^{\text{steel}}) \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_2 = \sum_{i=1}^n (E_i^{\text{conc}} W_i^{\text{conc}} + E_i^{\text{steel}} W_i^{\text{steel}}) \quad (2)$$

여기서, C_i^{conc} 과 C_i^{steel} 는 콘크리트와 철근의 단위 무게당 비용을 나타낸다. E_i^{conc} 과 E_i^{steel} 는 콘크리트와 철근의 단위 무게당 이산화탄소 배출량을 나타낸다. W_i^{conc} 과 W_i^{steel} 는 i 번째 부재에 사용된 콘크리트와 철근의 무게를 나타낸다.

기둥에 사용된 철근의 길이는 기둥의 길이와 동일하며, 보에 사용된 철근 길이는 보의 단부와 중앙부로 구분하여 길이를 산정하도록 한다. 보의 단부와 중앙부에 설치되는 철근의 길이는 각각 보 길이의 1/3로 가정한다.

본 연구에서는 총 4가지의 제약조건을 사용한다. 기둥의 강도조건을 고려하기 위해 식 (3)과 (4)를 이용한다. 이는 P-M 상관도 조건을 만족시키도록 하기 위해 고려된다. 보의 휨강도 조건을 고려하기 위해 식 (5)를 사용한다. 그리고 구조물의 층간변위율 조건을 고려하기 위해 식 (6)을 사용한다.

$$c_1 = R_{c1}^i / D_{c1}^i \quad (3)$$

$$c_2 = R_{c2}^i / D_{c2}^i \quad (4)$$

$$c_3 = R_b^i / D_b^i \quad (5)$$

$$c_4 = \Delta_{\max} / \Delta_a \quad (6)$$

여기서, R_{c1}^i 과 R_{c2}^i 는 i 번째 기둥에 작용하는 최대 축력과 휨모멘트를 나타낸다. D_{c1}^i 과 D_{c2}^i 는 i 번째 기둥이 가지는 설계압축강도와 설계휨강도를 나타낸다. R_b^i 과 D_b^i 는 i 번째 보에 작용하는 소요휨강도와 설계휨강도를 나타낸다. $\Delta_{\max}$ 과 Δ_a 는 최대 층간변위율과 허용 층간변위율을 각각 나타낸다. 제약률을 나타내는 식 (3)~(6)의 값이 1.0 이상이면 그 제약조건은 위배된 것을 의미한다.

전단보강근은 강도조건을 만족하는 범위 내에서 최소의 전단보강이 이루어지도록 자동 배근되도록 하고 이를 토대로 하여 전단보강량을 계산한다. 따라서 본 연구에서는 전단보강근과 전단강도조건이 각각 설계변수와 제약조건으로 고려되지 않는다.

이 밖에 기둥의 시공성을 고려하기 위하여 수직으로 연속된 기둥의 단면과 철근 개수에 관한 제약조건을 고려하였다. 이는 수직으로 연속된 기둥 중에서 아래 기둥의 단면 크기가 위 기둥의 단면보다 크거나 같도록 한다. 또한 아래 기둥의 철근 개수도 위 기둥의 철근 개수보다 크거나 같도록 제약한다. 이와 같은 기둥의 시공성에 관한 제약은 다른 제약 조건처럼 제약식을 이용하여 각 개체마다 평가하는 대신, 각 개체의 설계변수 값을 배당할 때 정렬 함수를 이용하여 아래에 위치하는 설계변수 값이 위의 설계변수 값보다 상대적으로 크거나 같도록 하였다. 이로써, 모든 개체에 배당된 설계변수 값은 기둥의 시공성 제약을 만족시키도록 하여 추가적인 제약식을 고려하지 않는다.

3.2 최적구조설계기법 흐름도

제시하는 최적화기법은 Fig. 1과 같이 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGA-II)를 사용한다. 이는 유전자알고리즘의 일종으로 두 개 이상의 목적함수를 고려할 때 사용되는 다목적 최적화 알고리즘이다. 비용과 이산화탄소 배출량이 사용된 재료의 양에 기반해서 사용되기 때문에 비용을 최소화하는 것이 이산화탄소 배출량을 최소화하는 것으로 여겨질 수 있다. 그러나 비용과 이산화탄소 배출량에 대한 철근과 콘크리트의 기여도가 다를 수 있기 때문에 두 목적함수 간에는 서로 모순관계(trade-off)가 성립될 수 있다.

Fig. 1 Flowchart of the proposed optimal design method

제약조건을 평가하기 위해 구조해석 모듈이 개체를 평가하는 과정에 사용된다. 이는 각 개체의 유전정보를 표현형으로 변환한 후 이를 바탕으로 구조모델링 및 구조해석을 수행한다. 또한 각 개체가 가지는 유전정보를 통해 각 부재의 단면정보를 읽어와서 부재의 설계강도를 계산하는 설계모듈이 사용된다. 이러한 결과를 이용해 각 개체의 제약조건 및 목적함수를 평가하게 된다. 모집단 내에 모든 개체에 대한 평가가 완료되면 정렬시키고, 종료조건을 만족시킬 때까지 돌연변이, 선별, 교배 등의 절차를 거치게 된다. 다윈의 진화론처럼 이러한 절차를 통해 모집단 내의 개체는 고려된 제약조건들을 모두 만족시키면서 목적함수에 대하여 향상된 개체들로 진화하게 된다.

4. 예제 적용

4.1 예제 개요

제시한 기법을 검증하기 위해 Fig. 2와 같은 4층 4경간 철근콘크리트 모멘트 골조 오피스 예제를 사용한다. 구조물에 작용하는 하중은 고정하중, 활하중, 지진하중을 고려하였으며 ASCE 7-05를 참고한다. site class는 B이며, S_s 와 S_1 는 각각 0.75, 0.3으로 가정한다. 본 연구에서는 구조물의 강도

Fig. 2 Elevation of an example structure

(a) Columns

(b) Beams

Fig. 3 Design variables for columns and beams

조건을 검토하기 위하여 OpenSees를 이용해 정적선형구조 해석을 사용한다. 콘크리트와 철근의 강도는 각각 24, 30, 40 MPa와 400MPa이다.

기둥과 보의 그룹 수는 Fig. 2와 같다. 기둥은 내부와 외부 기둥을 구분하며, 각각을 층별로 구분하여 총 8개의 그룹으로 나누어진다. 보는 층별로 구분하여 총 4개의 그룹으로 나누어진다. 기둥과 보의 각 그룹별 단면을 정의하는 설계변수는 Fig. 3과 같다. 기둥과 보의 단면을 정의하는 설계변수는 각각 3개와 4개이다. 따라서 Table 2와 같이 기둥과 보에 사용된 설계변수는 각각 24개와 16개이다.

같은 층에 위치한 보의 i 단과 j 단의 철근 배근은 동일한 것으로 가정하며, 압축철근비는 인장철근비의 50%로 가정한다. 만약 인장철근의 개수가 홀수이면 1을 더한 후 2로 나눈 값을 압축철근의 개수로 정한다. 압축 및 인장철근은 최소 및 최대 철근비 및 최소 철근 간격을 만족하는 범위 내에서

Table 2 Total number of design variables for beams and columns

Type	Number of groups	Number per group	Number per member
Columns	8	3	24
Beams	4	4	

Table 3 Scopes of each design variable

Design variable	Scope
Width of columns	Min. 300, Max. 800, Increment 50
Diameter of rebar in columns	19, 22, 25, 29, 32
Number of rebar in columns	4, 8, 12, 16, 20
Width of beams	Min. 300, Max. 500, Increment 50
Depth of beams	Min. 1.5 times width of beams, Max. 2.5 times width of beams, Increment 50
Diameter of tension rebar in beams	19, 22
Number of tension rebar in beams	Min. 2, Max. 20(Allow double layers)

Table 4 Cost and CO₂ emissions per weight of concrete and rebar

Type		Cost (Won/kg)	CO ₂ emissions (kg-CO ₂ /kg)
Concrete	24MPa	24.34	0.1030
Rebar	400MPa	753.33	0.3963

결정되도록 한다. 기둥의 단면은 정사각형으로 한정해서, 기둥의 폭이 정해지면 기둥의 단면이 정해지는 것으로 한다. 보의 단면은 정방형으로 한정한다. 보의 폭이 정해지면, 보의 깊이는 정해진 보의 폭의 1.5배부터 2.5배 사이의 값을 가지도록 한다. 단 보의 깊이의 최소 단위는 50으로 한다. 기둥과 보의 설계변수의 범위는 Table 3과 같다. 본 연구에서 사용된 재료별 단위 비용 및 이산화탄소 배출량은 Table 4와 같다.

4.2 결과

제시한 기법을 적용한 결과 Fig. 4와 같은 수렴과정을 통해 최적해를 얻을 수 있었다. 세대수가 증가함에 따라 해의 값이 감소하면서 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 경향은 비용이 감소하면 이산화탄소 배출량도 감소하는 것으로 나타났다. 최종적으로 얻은 최적해의 목적함수값을 Table 5에 정리하였으며, 비용과 이산화탄소 배출량에 대하여 콘크리트와 철근이 각각 차지하는 비중을 Fig. 5에 나타내었다. 두 최적해 모두 비용은 철근의 비중이 컸으며, 이산화탄소 배출

Fig. 4 Distributions of optimal solutions for each generation

Fig. 5 Percentage for concrete and rebar for each solution

Table 5 Values of objective functions of the optimal solutions

	Cost (Won/kg)	CO ₂ emissions (kg-CO ₂ /kg)
Solution 1	2,197,967	3,843.96
Solution 2	2,183,475	3,875.93
Solution 1 / Solution 2	100.66%	99.18%
Solution 2 / Solution 1	99.34%	100.83%

량은 콘크리트의 비중이 큰 것으로 나타났다.

두 해가 유사한 값을 보이지만 두 가지 이상의 해가 나타났다 것은 비용을 최소화하는 것이 이산화탄소 배출량을 최소화하는 것이 아니며, 이산화탄소 배출량을 최소화하는 것이 비용을 최소화하는 것이 아니라는 것을 의미한다. 비용을

Fig. 6 Material weights for each solution

최소화한 해(Solution 2)은 이산화탄소 배출량을 최소화한 해(Solution 1)보다 비용은 0.66% 감소한 반면, 이산화탄소 배출량은 0.83% 증가한 것으로 나타났다. 한편, 이산화탄소 배출량을 최소화한 해(Solution 1)은 비용을 최소화한 해(Solution 2)와 비교하여 비용은 0.66% 증가하고, 이산화탄소 배출량은 0.82% 감소한 것으로 나타났다.

두 해의 재료 무게를 비교하면 Fig. 6과 같다. Solution 1의 콘크리트와 철근의 무게는 각각 29,798kg, 1,955kg이었으며, Solution 2의 콘크리트와 철근의 무게는 각각 30,237kg, 1,921kg인 것으로 나타났다. 두 최적해를 비교하면, 비용을 최소화한 설계안은 상대적으로 콘크리트의 양이 많았으며, 이산화탄소 배출량을 최소화한 설계안은 상대적으로 철근의 양이 많은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 건물의 비용과 이산화탄소 배출량을 최적화하는 유전자 알고리즘 기반의 최적구조 설계기법을 제시하였다. 비용 및 이산화탄소 배출량 평가는 구조설계안으로부터 결정되는 구조재료의 물량을 기초로 하여 수행하였고, 수송, 시공, 운영 단계에서의 영향은 고려하지 않았다. 제시된 기법은 4층 철근콘크리트 모멘트 골조 예제에 제시하여 그 결과를 분석하였다.

예제 적용을 통해 두 개의 설계안을 얻을 수 있었다. 하나는 이산화탄소 배출량이 최소화된 설계안(Solution 1)이며, 다른 하나는 비용이 최소화된 설계안(Solution 2)이다. 철근 콘크리트는 서로 다른 두 재료가 조합되어 만들어지며, Table 4와 같이 두 재료의 단위 비용과 이산화탄소 배출량의 비율이 서로 다르기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. Table 4에 나타난 것처럼, 콘크리트에 대한 철근의 상대적 비율은 이산화탄소 배출량에 대한 그것들의 상대적 비율보다 크다. 그래서 비용이 최소화된 설계안(Solution

2)은 상대적으로 철근의 양이 적게 나타나고, 이산화탄소 배출량이 최소화된 설계안(Solution 1)은 상대적으로 철근의 양이 많은 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2059874).

References

- ACI 318-08 (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute.
- ASCE.(2006) *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures(ASCE 7-05)*. New York(NY): American Society of Civil Engineer.
- Chan, C.M., Zou, X.K. (2004) Elastic and Inelastic Drift Performance Optimization for Reinforced Concrete Buildings under Earthquake Loads, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 33, pp.929~950.
- Choi, S.W., Jeon, J.H., Lee, H., Kim, Y., Park, H.S. (2013) CO₂ Emissions Evaluation for Steel Reinforced Concrete Columns Based on the Optimal Structural Design, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26, pp.335~342.
- Choi, S.W., Kim, Y., Lee, J., Hong, K., Park, H.S. (2013) Minimum Column-to-Beam Strength Ratios for Beam-hinge Mechanisms Based on Multi-objective Seismic Design, *J. Constr. Steel Res.*, 88, pp.53~62.
- Choi, S.W., Park, H.S. (2012) Multi-objective Seismic Design Method for Ensuring Beam-hinging Mechanism in Steel Frames, *J. Constr. Steel Res.*, 74, pp.17~25.
- Farhat, F., Nakamura, S., Takahashi, K. (2009) Application of Genetic Algorithm to Optimization of Buckling Restrained Braces for Seismic Upgrading of Existing Structures, *Comput. & Struct.*, 87, pp.110~119.
- Fragiadakis, M., Papadrakakis, M. (2008) Performance-based Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 37, pp.825~844.
- Jung, Y.B., Yang, K.H. (2015) Mixture-Proportioning Model for Low-CO₂ Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials, *J. Korea Concr. Inst.*, 27, pp. 427~434.
- Kwak, H.G., Kim, J.E. (2007) Optimum Design of Reinforced Concrete Plane Frames Based on Section Database, *J Comput.l Struct. Eng. Inst Korea*, 20, pp.165~179.
- Liu, M., Burns, S.A., Wen, Y.K. (2005) Multiobjective Optimization for Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frame Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 34, pp.289~306.
- Nimtawat, A., Nanakorn, P. (2009) Automated Layout Design of Beam-slab Floors using a Genetic Algorithm, *Comput. & Struct.*, 87, pp.1308~1330.
- Oh, B.K., Park, J.S., Choi, S.W. Park, H.S. (2016) Design Model for Analysis of Relationships Among CO₂ Emissions, Cost, and Structural Parameters in Green Building Construction with Composite Columns, *Energy & Build.*, 118, pp. 30~315.
- Park, H.S., Kwon, B., Shin, Y., Kim, Y., Hong, T., Choi, S.W. (2013) Cost and CO₂ Emission Optimization of Steel Reinforced Concrete Columns in High-rise Buildings, *Energies*, 6, pp.5609~5624.
- Park, H.S., Lee, H., Kim, Y., Hong, T., Choi, S.W. (2014) Evaluation of the Influence of Design Factors on the CO₂ Emissions and Costs of Reinforced Concrete Columns, *Energy & Build.*, 82, pp.378~384.
- Xu, C., Lin, S., Yang, Y. (2015) Optimal Design of Viscoelastic Damping Structures using Layerwise Finite Element Analysis and Multi-objective Genetic Algorithm, *Comput. & Struct.*, 157, pp.1~8.
- Yeo, D., Gabbai, R.D. (2011) Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures Through Embodied Energy Optimization, *Energy & Build.*, 43, pp.2028~2033.

요 지

본 연구에서는 철근콘크리트 건물에 대한 유전자 알고리즘 기반의 최적구조설계기법을 제시하고자 한다. 목적함수는 구조물의 비용과 이산화탄소 배출량을 동시에 각각 최소화하는 것이다. 비용 및 이산화탄소 배출량은 구조설계안에서 얻을 수 있는 단면치수, 부재길이, 재료강도, 철근량 등과 같은 설계정보를 통해 계산한다. 즉, 구조물의 물량을 기초로 하여 비용과 이산화탄소 배출량을 평가한다. 재료의 운반, 시공 및 건물 운영 단계에서 발생하는 비용 및 이산화탄소 배출량은 본 연구에서 제외한다. 제약조건은 철근콘크리트 건물을 구성하는 기둥과 보 부재의 강도조건과 층간변위조건이 고려된다. 제약조건을 평가하기 위해 OpenSees를 활용한 선형정적해석이 수행된다. 제약조건을 만족시키면서 목적함수에 대해 최소의 값을 제시하는 설계안을 찾기 위해 유전자 알고리즘이 사용된다. 제시한 알고리즘의 적용성을 검증하기 위해 4층 철근콘크리트 모멘트 골조 예제에 제시하는 기법을 적용하여 검증한다.

핵심용어 : 비용, 이산화탄소 배출량, 철근콘크리트 모멘트 골조, 유전자알고리즘