

지속가능 설계법을 이용한 철근 콘크리트 기둥의 내재에너지 및 이산화탄소 배출 최적화 해석

김 경 환¹ · 여 동 훈² · 이 상 호¹ · 윤 영 철^{3*}

¹연세대학교 토목환경공학과, ²미국 국립표준기술연구소, ³명지전문대학 토목과

Optimization Analysis for Embodied Energy and CO₂ Emission in Reinforced Concrete Column Using Sustainable Design Method

Kyeong-Hwan Kim¹, DongHun Yeo², Sang-Ho Lee¹ and Young-Cheol Yoon^{3*}

¹School of Civil & Environmental Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

²National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA

³Department of Civil Engineering, Myongji College, Seoul, 03656, Korea

Abstract

This study presents a sustainable design method to optimize the embodied energy and CO₂ emission complying with the design code for reinforced concrete column. The sustainable design method effectively achieves the minimization of the environmental load and energy consumption whereas the conventional design method has been mostly focused on the cost saving. Failure of reinforced concrete column exhibits compressive or tensile failure mode against an external force such as flexure and compression; thus, optimization analyses are conducted for both failure modes. For the given sections and reinforcement ratios, the optimized sections are determined by optimizing cost, embodied energy, and CO₂ emission and various aspects of the sections are thoroughly investigated. The optimization analysis results show that 25% embodied energy and 55% CO₂ emission can be approximately reduced by 10% increase in cost. In particular, the embodied energy and CO₂ emission were more effectively reduced in the tensile failure mode rather than in the compressive failure mode. Consequently, it was proved that the sustainable design method effectively implements the concept of sustainable development in the design of reinforced concrete structure by optimizing embodied energy consumption and CO₂ emission.

Keywords : reinforced concrete column, cost, embodied energy, CO₂ emission, optimization analysis, sustainable design method

1. 서 론

최근 들어 지속가능한 성장(sustainable development)에 대한 관심이 높아지면서 선진국들을 중심으로 인류가 소비하는 모든 에너지를 수치적으로 산정하고 제어하려는 노력이 활발히 진행되고 있다(Lippiatt, 1999; Ding, 2008). 특히, 건설 산업은 전체 에너지의 40% 정도를 소비하는 것으로 조사된 바 있듯이 에너지 소비 측면에서 미치는 영향이 막대하므로 건설 산업 프로세스에 내재에너지 개념을 도입하여 에너지 소비율을

감소시키려는 노력이 지속되고 있다(Horvath, 2004; IEA, 2005; Langston and Langston, 2008). 내재에너지는 재료의 생산, 운송, 가공, 결합, 설치, 해체와 분해에 이르는 건설공정의 전 과정에 걸친 에너지 소비를 정량화하기 위해 도입된 개념이다(Ibn-Mohammed *et al.*, 2013). 또한, 내재 에너지 산정은 건설기간뿐만 아니라 구조물의 사용기간 동안 유지보수과정에서 소비되는 에너지와 구조물의 철거 등에 사용된 에너지도 포함한다(UNDP, 2007; Goggins *et al.*, 2010). 그러나 구조물의 생애주기 동안의 내재에너지를 산정

* Corresponding author:

Tel: +82-2-300-1135; E-mail: ycyoon@mjc.ac.kr

Received May 16 2017; Revised May 23 2017;

Accepted May 29 2017

©2017 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.

하는 일은 매우 어려울 뿐만 아니라, 현재까지 연구의 대상이 사람들이 거주하는 건물에 편중되어 있어서 교량이나 댐 같은 사회기반 시설물에서 발생하는 내재에너지의 산정에 대한 고찰은 부족한 실정이다.

내재에너지 못지않게 주목 받고 있는 이산화탄소는 교도의 정서(kyoto protocol)에 지정된 6대 온실가스 중 하나로서 세계적인 기후 변화의 주요 원인으로 지목되고 있으며, 이런 이유로 온실가스 배출량을 줄이기 위한 각국의 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 예를 들어, 미국에서는 2020년까지 2005년도 탄소 배출량대비 17%를 감소시킬 계획을 갖고 있으며, 2050년도까지 83%를 감소시키는 계획을 수립하였다(The White House, 2009). 유럽연합 국가들은 1990년도의 탄소 배출량 대비 최소 20%이상 감소시킬 예정이며, 2020년까지 30% 감소를 목표로 하고 있다. 중국과 인도는 각각 2020년까지 2005년 배출량을 기준으로 40~45%와 20~25%의 감소를 약속하였으며, 브라질의 경우 38~42%의 배출량 감소를 목표로 수립하였다(Lu *et al.*, 2012). OECD(organization for economic cooperation and development)에 가입되어 있는 한국 역시 온실가스 배출량의 감소를 의무화 할 수밖에 없으며, 이에 많은 비용과 노력을 투입해야 하는 것이 당연한 현실이다.

온실가스 배출권 거래제도(emission trading system)와 같이 에너지나 온실가스 배출량을 줄이는 것이 금전적인 이익으로 연결되는 제도적인 규제가 시행되고 있기 때문에 비용 절감만 최우선으로 고려하는 기존의 개발 개념에서 탈피한 지속가능 개발 개념이 점차 중요해지고 있다(Struble and Godfrey, 2007; Ashley and Lemay, 2008). 지속가능 개발은 단기적인 자연자원의 파괴를 피하면서 경제적인 성장을 창출하는 방법이며, 사회가 발전하는데 있어서 경제적인 측면만 강조하는 것을 우려하여 도입된 개념이다. 이와 같이 자연자원의 보존이 경제적 이익으로 보상되는 국제적인 규칙이 정해지고 있는 추세이기 때문에 지속가능 발전이 더 이상 경제적 손실로 연결되지 않는다. 이로 인해 내재에너지와 이산화탄소 배출량 감소에 대한 연구의 중요성이 커지고 있으며, 건설산업에서는 기존의 비용최적화에 기반한 강도중심의 설계법에서 벗어나 내재에너지를 최적화 할 수 있는 설계 방법들이 연구되고 있다(Davidovits, 1993; Thormark, 2002; Gartner, 2004; Yeo and Gabbai, 2011). 건설산업에서는 콘크리트와 철근이 주요 재료로 사용되는데, 특히 콘크리트의 에너지 소비율이 상대적으로 높다. 그럼에도 불구하고 전 세계적으로 콘크리트의 생산량은 여전히 증가하는 추세이며, 내재에너지 소비량도 함께 증가하고 있다(CTBUH, 2002). 이러한 흐름의 초기에는 저탄소 시멘트와 같이 재료적인 측면에서 에너지 소비를 줄이려는 노력이 있었지만(Cabeza, 2013), 최근에는 재료뿐만

아니라 구조물의 설계 및 관리 과정에서 소비되는 에너지를 줄일 수 있는 방법들이 함께 모색되고 있다(Park *et al.*, 2013; Yeo and Potra, 2015).

앞서 언급된 국제적 흐름에도 불구하고 국내의 사회기반 시설물 설계는 설계기준을 만족시키면서 공사비를 최소화하려는 노력에 집중되어 있다. 그러나 이러한 접근은 국제적인 지속가능 발전 추세에 부합하지 못할 뿐만 아니라 추후에 온실가스 배출권 거래제도가 활성화 될 경우 부족한 준비로 인해 경제적 손실까지 연결될 우려가 있다. 그러므로 구조물 설계시 비용과 에너지 소비의 상관관계에 대해 파악하고 분석할 수 있는 방법들이 개발될 필요가 있다. 또한, 내재에너지는 재료의 생산에서부터 유통 및 대상 구조물의 시공과 폐기에 이르는 생애주기 전과정과 연관되기 때문에 설계단계에서 구조물의 전생애주기를 고려하는 효과를 갖는다. 본 논문에서는 Yeo와 Gabbai(2011)와 Yoon 등(2014)이 제시한 보 설계 위주의 지속가능 설계법을 확장하여 철근 콘크리트 기둥을 지속가능 설계법으로 설계할 수 있는 방법을 제시한다. 철근 콘크리트 기둥의 파괴는 단면의 기하형상과 하중형태에 따라 압축지배와 인장지배로 나타나기 때문에 각각의 파괴모드를 고려한 최적화 해석이 수행된다. 목적 함수로 설정된 비용(cost), 내재에너지(embodied energy), 이산화탄소 배출량(CO₂ emission)에 따른 최적단면을 산정하고, 콘크리트 구조설계기준(Korea Concrete Institute (KCI), 2012)에 따른 제약조건 내에서 다양한 분석을 통해 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량 간의 상관관계를 밝히고자 한다.

2. 철근 콘크리트 기둥의 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량에 대한 최적화 설계

2.1 P-M 상관도를 이용한 철근 콘크리트 기둥 설계

일반적으로 기둥은 축하중과 편심에 의한 휨모멘트를 동시에 받기 때문에 설계시 두 외력을 함께 고려하기 위해 P-M 상관도를 활용한다. 또한, 축하중과 휨모멘트의 비율에 따라 철근 콘크리트 기둥은 압축지배 또는 인장지배 상태에 놓이게 된다. 즉, 철근과 콘크리트가 동시에 파괴되는 균형파괴 상태를 기준으로 편심($e = M_n/P_n$)의 영향이 작으면 콘크리트의 압축파괴가 전체 파괴거동을 지배하고, 편심의 영향이 크면 철근의 인장파괴가 전체 파괴거동을 지배하게 되는데, 본 연구에서는 두 가지 파괴모드에 대해 모두 고려한다.

콘크리트 구조설계기준(Korea Concrete Institute(KCI), 2012)에 부합하는 띠철근이 배근된 것으로 가정하고, 외부로부터 가해지는 계수 축하중(P_u)과 계수 모멘트(M_u)에 대한 설계대상 기둥의 해석가능 영역(feasible region)을 결정하기

위한 설계 하중(P_d)과 설계 모멘트(M_d)는 아래의 식으로부터 결정된다.

$$P_d = \phi P_n \geq P_u \quad (1)$$

$$M_d = \phi M_n \geq M_u \quad (2)$$

$$\phi = \begin{cases} 0.65 & \epsilon_t < 0.002 \\ 0.65 + \frac{200}{3}(\epsilon_t - 0.002) & 0.002 \leq \epsilon_t \leq 0.005 \\ 0.85 & 0.005 < \epsilon_t \end{cases} \quad (3)$$

여기서, P_n 과 M_n 은 공칭 축강도와 모멘트 강도를 나타내고, ϕ 는 강도감수계수, ϵ_t 는 철근의 순인장변형률을 의미한다. 철근 콘크리트 기둥은 단주로 가정하고, 위의 설계 조건들과 P-M 상관도를 활용하여 주어진 외력에 대한 설계 가능범위를 산정하였다. 보다 구체적으로 기둥의 단면형상과 철근비에 변화를 주면서 철근 콘크리트 재료비와 내재에너지 그리고 이산화탄소 배출량을 최적화한 단면을 결정하고, 다양한 조건을 변화시키면서 설계 단면과 설계 변수 그리고 최적화 목적함수 값의 변화를 비교·분석하였다.

2.2 설계 변수(variables)와 설계 파라미터(parameters)

설계 단면을 최적화하기 위한 설계 변수로 기둥단면의 폭(b), 높이(h), 철근비(ρ)를 설정하였다. 설계 변수의 범위는 Table 1에 정리했다. 설계시 철근과 콘크리트의 규격화된 강도가 사용되고 이에 따라 설계 변수 값들이 정해지며, 철근비는 실용적인 설계 관행을 반영하기 위해 4%로 제한하였다.

최적단면 설계시 설계 변수 외에 상수 값으로 정의되는 설계

Table 1 Design variables and their ranges

Variables	Ranges
Width	300mm ≤ b ≤ 800mm
Height	300mm ≤ h ≤ 800mm
Reinforcement ratio	0.01 ≤ ρ ≤ 0.04

Table 2 Design parameters

Parameters	Values
Factored moment and axial force for Load Case 1	$M_{u1} = 220\text{kN} \cdot \text{m}$, $P_{u1} = 4000\text{kN}$ ($e_1 = 0.05\text{m}$)
Factored moment and axial force for Load Case 2	$M_{u2} = 540\text{kN} \cdot \text{m}$, $P_{u2} = 1700\text{kN}$ ($e_2 = 0.32\text{m}$)
Factored moment and axial force for Load Case 3	$M_{u3} = 500\text{kN} \cdot \text{m}$, $P_{u3} = 500\text{kN}$ ($e_3 = 1.00\text{m}$)
Young's Modulus of steel	$E_s = 2 \times 10^5 \text{MPa}$
Specific mass of steel	$\rho_s = 7850 \text{kg/m}^3$
Concrete cover (including radius of bar)	$d_c = 65\text{mm}$

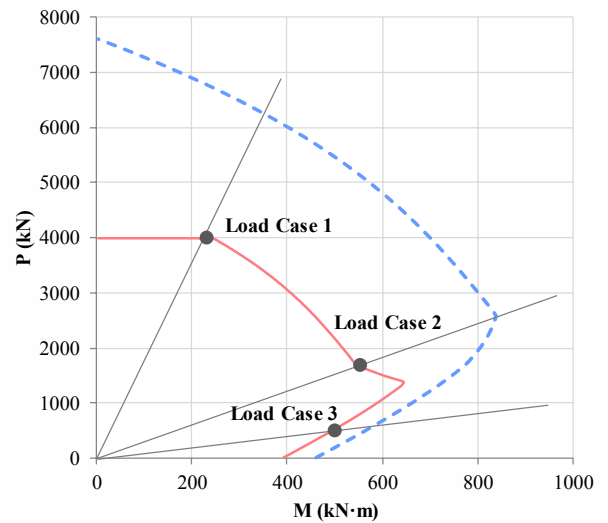


Fig. 1 Load cases depicted in column interaction diagram for the optimization analysis

파라메타들은 Table 2에 정리하였다. Fig. 1과 같이 가로와 세로가 모두 500mm이고 철근비가 0.02인 철근 콘크리트 단면의 P-M 곡선을 기준으로 활용하여 압축지배와 인장지배를 모사하는 세 가지 경우에 대한 편심, 축력, 모멘트를 설정하였다. Load Case 1은 상대적으로 축력이 커서 콘크리트의 압축파괴가 먼저 일어나는 경우, Load Case 2는 설계 변수에 따라서 콘크리트가 먼저 파괴되거나 철근이 먼저 파괴될 가능성이 공존하는 경우, Load Case 3은 축력이 상대적으로 작아 철근의 인장파괴가 먼저 발생하는 경우를 각각 대표한다. Load Case 1과 Load Case 3만 이용하여 압축지배와 인장지배를 고려할 수 있지만, 편심이 증가하면서 압축지배가 인장지배로 바뀌는 현상을 분석하기 위해 Load Case 2를 추가하였다. 그 외의 상수들은 콘크리트 구조설계기준(Korea Concrete Institute (KCI), 2012)을 참고하였다.

2.3 목적함수와 최적화 해석방법

본 논문에서는 철근 콘크리트 기둥 단면의 폭과 높이를 설계 변수로 설정했기 때문에 Fig. 2와 같이 정사각형 단면뿐만

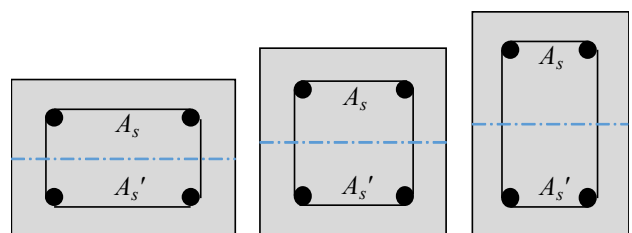


Fig. 2 Reinforced concrete column sections for optimization analysis

아니라 직사각형 단면들도 고려할 수 있다. 단면 위쪽의 철근량 (A_s)과 아래쪽의 철근량(A_s')이 같도록 철근을 대칭으로 배치하여 소성중심이 단면 중앙에 위치하도록 하였다.

철근 콘크리트 기둥 설계시 본 연구에서 최적화할 대상은 비용, 내재에너지 그리고 이산화탄소 배출량이다. 우선, 공사비에 대한 최적화를 위해 단위길이당 보의 총비용(재료비)을 나타내는 목적함수 f 를 식 (4)와 같이 정의하였다(Yeo and Gabbai, 2011). 내재에너지는 재료의 생산, 운송, 가공, 결합, 설치 등의 과정에서 발생하는 에너지 소비를 정량화한 것으로 본 논문에서는 철근과 콘크리트에 대하여 산정된 내재에너지 값을 사용한다. 단위길이당 전체 내재에너지를 최적화하기 위한 목적함수 g 는 식 (5)와 같이 설정하였다. 이산화탄소 배출량의 최적화는 내재에너지를 최적화하는 과정과 비슷하게 이루어지며, 이산화탄소 배출량을 최적화하기 위한 목적함수 k 는 식 (6)과 같이 정의하였다. 모든 목적함수들은 단면크기(b 와 h)와 철근비(ρ)을 변수로 사용하며, 이 변수들은 앞서 제시한 설계변수로부터 정의된다(Yeo and Gabbai, 2011; Yoon *et al.*, 2014).

$$f(b, h, A_s, A_s') = C^c \left[(bh - A_s - A_s') + \rho_s (A_s + A_s') \frac{R}{100} \right] \quad (4)$$

$$g(b, h, A_s, A_s') = (bh - A_s - A_s') E_b^c + \rho_s (A_s + A_s') E_s^c \quad (5)$$

$$k(b, h, A_s, A_s') = (bh - A_s - A_s') E_s^c + \rho_s (A_s + A_s') E_s^c \quad (6)$$

윗 식들에서 C^c 는 $1m^3$ 단위 콘크리트의 비용, R 은 C^c 에 대한 100kg 단위 철근의 비용 비율을 의미한다. E_b^c 는 $1m^3$ 단위 콘크리트의 내재에너지(MJ)이고, E_s^c 는 1kg 단위 철근의 내재에너지(MJ)이다. E_s^c 는 $1m^3$ 단위 콘크리트에 대한 이산화탄소 배출량(kgCO₂)이고, E_s^c 는 1kg 단위 철근에 대한 이산화탄소 배출량(kgCO₂)이다. 비용의 경우 콘크리트 $1m^3$ 의 가격과 철근 100kg의 가격이 대략 비슷하기 때문에 목적함수 f 에 철근과 콘크리트의 비용 비율 R 을 활용하였다. 콘크리트와 철근의 비용은 시기 및 지역에 따라 차이가 날 수 있지만, 이전 연구들을 참고하면 R 값이 대략 0.8~1.2 사이임을 알 수 있다(Sahab *et al.*, 2005; Paya-Zaforteza *et al.*, 2009; Guerra *et al.*, 2011). 본 논문에서는 콘크리트의 굵은 골재 최대치수(G_{max}), 설계기준강도(f_{ck}), 슬럼프 값을 각각 25mm, 24MPa, 120mm로 가정하였고, 철근의 항복강도(f_y)와 직경은 각각 400MPa, D16으로 가정하였다. 해석에 사용된 콘크리

트와 철근의 재료적 특성을 나타내는 설계 파라메타들은 Table 3에 정리하였다. 본 연구에서 내재에너지 값과 이산화탄소 배출량은 선행 연구결과들을 참고하였다(CBPR, 2003; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011; Nara market, 2016). 콘크리트와 철근의 강도에 따라서 내재에너지와 이산화탄소 배출량 값의 변화가 생기지만 비용에 비교하여 변화 폭이 적은 편이다. 철근과 콘크리트의 비용이나 내재에너지 또는 이산화탄소 배출량 값에 따라서 최적 해석 결과가 달라질 수 있기 때문에 이러한 자료들을 데이터베이스화 한다면 일관성 있는 지속가능 설계법의 적용이 가능하다.

목적함수의 최적화에 앞서 P-M 상관도를 이용하여 해석가능 영역을 조사하였으며, 철근 콘크리트 기둥의 강도 계산시 균형 상태를 묘사하기 위해 균형 축하중과 균형 모멘트를 다음과 같은 구속조건으로 정의하였다.

$$P_b = 0.85f_{ck}a_b b + f_y A_s' - f_y A_s \quad (7)$$

$$M_b = 0.85f_{ck}a_b b \left(\frac{h}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + f_y A_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) - f_y A_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (8)$$

여기서, d 는 기둥의 연단에서 인장철근까지의 거리, d' 는 단면 전체 높이에서 d 를 뺀 거리, a_b 는 압축부 콘크리트의 등가응력 사각형 깊이를 의미한다. 식 (7)~(8)에서 정의된 균형 축하중과 균형 모멘트로부터 균형 편심($e_b = M_b/P_b$)을 계산할 수 있으며, 이 값은 철근 콘크리트 기둥의 파괴모드 및 해석가능 영역 산정에 사용된다. 또한 압축력만 존재하는 하중 상태를 나타내기 위하여 다음과 같은 구속조건을 추가로 고려하였다.

$$P_0 = 0.85f_{ck}(bh - (A_s' + A_s)) + f_y A_s' + f_y A_s \quad (9)$$

해석시 공칭 모멘트는 균형 모멘트보다 큰 값을 가질 수 없으며, 공칭 축강도는 식 (9)에서 계산되는 P_0 를 넘을 수 없다. 이와 같은 구속조건을 모두 만족한 공칭 축강도와 휨강도에 강도감소 계수를 곱하여 해석가능 영역 산정에 활용한다. 그리고 철근비를 4%까지로 제한한 것도 하나의 구속조건이 된다. 본 연구에서는 지속가능 설계법을 적용하기 위한 철근 콘크리트 기둥의 최적화 해석을 위해서 최근 수치해석 프로그래밍 언어로 널리 사용되고 있는 매트랩(Matlab R2016a manual, 2016) 프로그램을 사용하였다.

Table 3 Design parameters of concrete and reinforcement steel for definition of the objective functions

Category	Concrete	Reinforcement steel
G_{max} - f_{ck} -slump / f_y -diameter	25-24-120	SD400-D16
Cost(Nara market, 2016)	61,920 ₩(KRW)/m ³	592.24 ₩(KRW)/kg
Embodied energy(CBPR, 2003)	3282 MJ/m ³	8.9 MJ/kg
CO ₂ emission(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)	421.09 kgCO ₂ /m ³	0.41 kgCO ₂ /kg

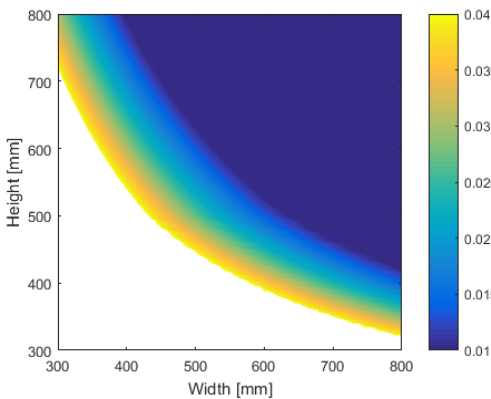
3. 철근 콘크리트 기둥에 대한 지속가능 설계 결과분석

3.1 직사각형 기둥단면에 대한 해석가능 영역과 최적단면

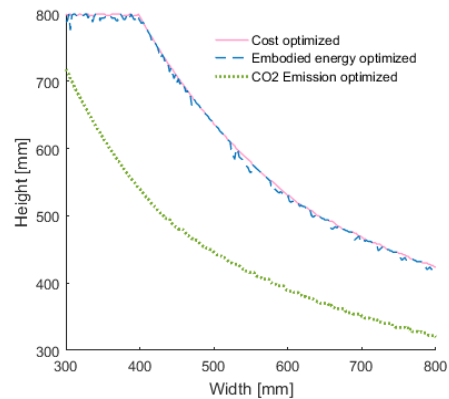
앞 장에서 제시된 최적화 알고리즘을 프로그래밍하여 철근 콘크리트 기둥단면에 대한 해석가능 영역과 각 목적함수의 대한 최적단면을 산정하였다. 철근 콘크리트 기둥은 압축지배 (crushing of concrete)와 인장지배(yielding of steel) 상태에서의 거동이 서로 다르기 때문에 콘크리트가 먼저 파괴되는 경우와 철근이 먼저 파괴되는 경우 그리고 콘크리트와 철근이 거의 동시에 파괴되는 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 설정된 설계 변수들에 대한 철근 콘크리트 기둥의 비용변화 추이를 확인하고, 내재에너지와 이산화탄소 배출량의 변화 추이도 함께 비교·분석하였다.

콘크리트가 먼저 압축파괴되는 압축지배 상태에서의 해석가능 영역과 철근비 분포를 Fig. 3(a)에 contour plot으로 나타냈다. 해석가능 영역에 대한 계산결과로부터 기둥의 단면이 일정 크기

이상 되어야 가해진 외력에 대해 설계가 가능함을 확인할 수 있다. 즉, Figs. 3(a), 4(a), 5(a)에서 칼라로 표시되지 않은 영역은 설계가 불가능한 단면크기를 나타낸다. 또한, contour plot에서 철근비의 변화가 나타나는 영역의 폭이 상대적으로 좁은 경우는 압축력에 대한 철근 강도의 역할이 상대적으로 작다는 것을 암시한다. Fig. 3(b)는 압축파괴 상태에서 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량에 대한 최적단면의 변화추이를 보여준다. 내재에너지에 대한 최적단면은 비용에 대한 최적 단면과 유사하게 철근비를 작은 상태로 유지하면서 단면크기가 최소가 되도록 결정되지만, 이산화탄소 배출량에 대한 최적 단면은 오히려 철근비가 높더라도 절대적인 단면크기를 더 많이 감소시키도록 결정된다. 즉, 압축지배 상태에서는 비용과 내재 에너지에 대한 철근의 영향력이 상대적으로 크기 때문에 철근량을 줄이는 것이 최적화에 유리하지만, 이산화탄소 배출량의 경우 철근의 영향력이 콘크리트의 영향력 보다 상대적으로 작기 때문에 철근량의 감소보다는 콘크리트 면적을 줄이는 것이 최적화에 유리하다는 의미이다.

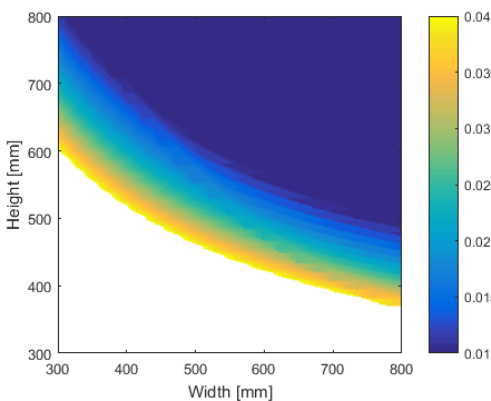


(a) Feasible design region with respect to reinforcement ratio

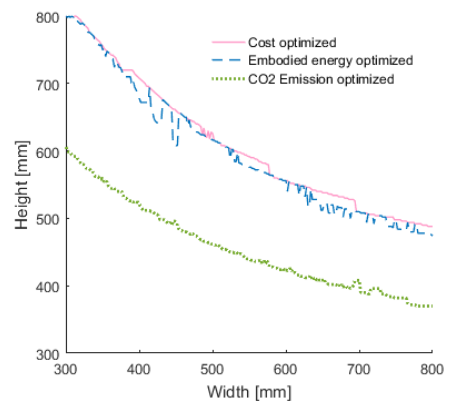


(b) Optimized sections with respect to objective functions

Fig. 3 Optimization analysis results by Load Case 1 involving a compressive failure(crushing of concrete)

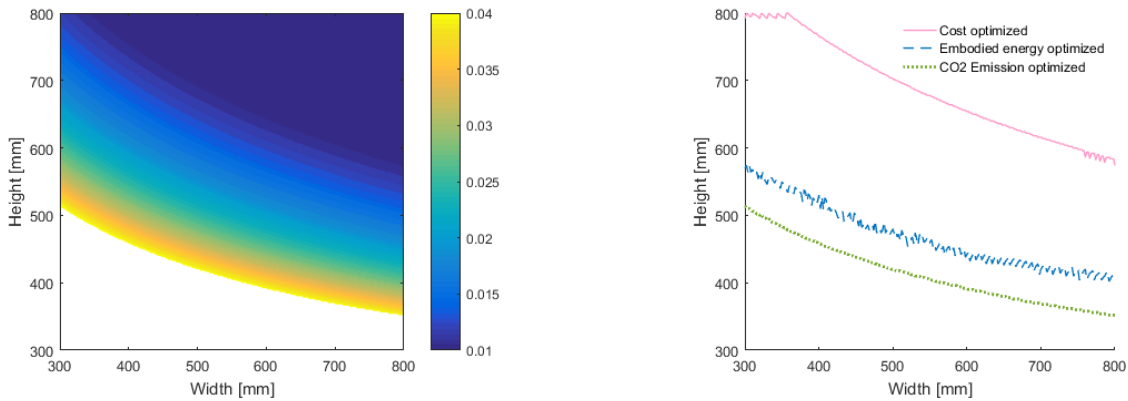


(a) Feasible design region with respect to reinforcement ratio



(b) Optimized sections with respect to objective functions

Fig. 4 Optimization analysis results by Load Case 2 involving a balanced condition



(a) Feasible design region with respect to reinforcement ratio (b) Optimized sections with respect to objective functions

Fig. 5 Optimization analysis results by Load Case 3 involving a tensile failure(yielding of steel)

Fig. 4(a)~(b)는 콘크리트와 철근의 파괴가 거의 동시에 이루어질 때의 최적화 해석결과를 보여준다. 휨모멘트가 늘어나고 축하중이 줄어들어 편심이 증가하여 압축지배에서 인장지배로 넘어갈 때 단면의 폭이 작은 경우에는 해석가능 영역이 증가하지만, 단면의 폭이 큰 경우에는 해석가능 영역이 감소한다. 또한, 철근비의 변화가 나타나는 영역의 폭이 압축지배일 때보다 커졌는데, 이것은 철근의 영향이 증가하고 있음을 암시한다. 각 목적함수에 대한 최적단면은 전체적으로 압축지배인 경우와 비슷한 경향을 보이지만, 내재에너지에 대한 최적단면이 비용에 대한 최적단면과 조금씩 차이를 나타내기 시작하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(a)에는 인장지배인 경우 해석 가능영역을 철근비와 함께 도시하였고, Fig. 5(b)에는 목적함수들에 대한 최적단면을 도시하였다. 인장지배의 경우 단면의 폭이 작더라도 철근을 이용하여 휨모멘트를 견딜 수 있기 때문에 해석가능 영역이 압축지배 또는 균형상태의 경우에 비해 상대적으로 크다. 또한, 압축지배와 비교하여 철근비의 변화가 나타나는 영역의 폭이 더 커진 것으로부터 인장지배에서 철근의 역할이 크다는 것을 확인할 수 있다. 인장지배인 경우 철근비 분포의 더 큰 변화로 비용과 이산화탄소 배출량에 대한 최적단면의 차이가 압축지배인 경우 보다 더 커진 것을 알 수 있다. 특히, 압축지배인 경우 내재에너지에 대한 최적단면이 비용에 대한 최적단면과 유사했던 것과 달리 인장지배인 경우에는 내재에너지에 대한 최적단면은 오히려 이산화탄소 배출량에 대한 최적단면과 더 가까워졌다. 이것은 인장지배일 때 철근의 대한 의존도가 높아지면서 내재에너지에 대한 철근의 영향력이 증가했기 때문이다.

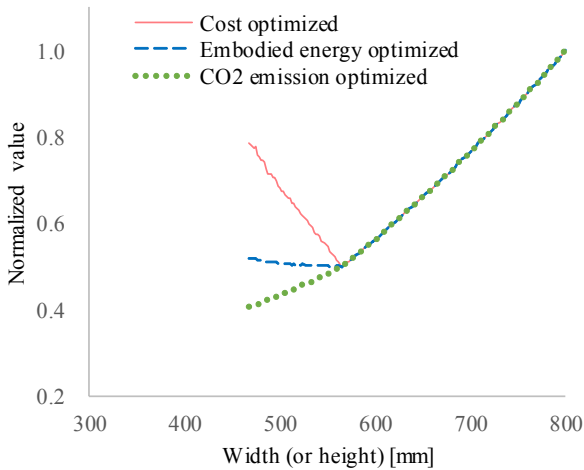
정리하면, 철근 콘크리트 기둥이 압축지배에서 인장지배로 변화할 때 철근의 영향력이 커지면서 단면의 해석가능 영역이 증가한다. 이 때, 비용과 이산화탄소 배출량에 대한 최적단면들의 차이가 커지고, 내재에너지에 대한 최적단면도 크게 변화

하여 비용에 대한 최적단면 보다는 이산화탄소 배출량에 대한 최적단면과 가깝게 된다. 이렇게 철근 콘크리트 기둥은 파괴모드와 최적화하는 목적함수에 따라 최적단면의 차이가 크기 때문에 비용 최적화에만 초점을 맞춘 기존의 설계 방법으로는 지속가능한 개발의 개념을 도입하기에 한계가 있다. 그러므로 기존의 설계 방법에서 더 나아가 내재에너지와 이산화탄소 배출량에 대한 최적화도 함께 고려할 수 있는 본 연구에서 제시한 지속가능 설계법을 개발하는 것이 중요한 의미를 갖는다.

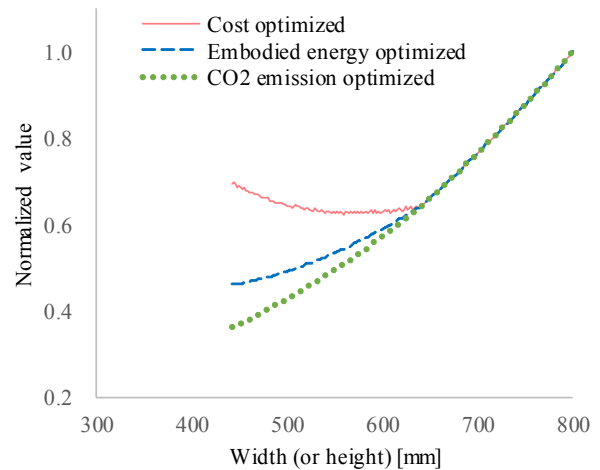
3.2 정사각형 기둥의 최적화 해석

단면형상에 따른 각 목적함수의 변화를 분석하기 위해 철근 콘크리트 기둥의 단면을 정사각형으로 가정하고 최적화 해석을 수행하였다. 압축지배와 인장지배인 경우 정사각형 기둥의 최적단면 변화를 조사하기 위해 Load Case 1과 Load Case 3을 외력으로 고려한 최적해석 결과를 Fig. 6(a)~(b)에 도시하였다. 가로축은 정사각형 단면의 폭(또는 높이)이며, 세로축은 목적함수 값들을 나타낸다. 모든 목적함수 값들은 각 목적함수의 최대값을 이용하여 정규화하여 단위가 서로 다른 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량의 변화추이를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

Fig. 6(a)~(b)에서 제시한 해석결과로부터 인장지배인 경우 해석가능 영역과 최적단면에 대한 목적함수 값들이 급하게 변하기 시작하는 단면크기가 압축지배인 경우에 비해 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 주로 철근비의 영향 때문인데, 비용을 최적화시킨 경우 특정한 단면크기에서 최소값을 보이고 그보다 단면이 크거나 작으면 비용이 증가한 반면, 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 경우에는 단면크기가 작을수록 이산화탄소 배출량이 작게 나타나 설계 단면이 작을수록 유리하다는 것을 보여준다. 내재에너지를 최적화시킨 경우 압축지배일 때에는



(a) Regularized objective function responses for compressive failure(crushing of concrete)



(b) Regularized objective function responses for tensile failure(yielding of steel)

Fig. 6 Regularized objective function responses with respect to the optimized sections for square cross section

특정한 크기보다 단면이 작아져도 내재에너지 값의 변화가 거의 없지만, 인장지배일 때에는 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 경우와 유사하게 단면이 어느 수준 이하로 작아질 때 그 값이 계속 감소하는 모습을 보였다. 결국, 파괴모드와 상관없이 비용을 최적화시킨 단면과 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 단면은 큰 차이를 보였으며, 내재에너지를 최적화시킨 단면은 파괴모드에 따라 서로 다른 경향을 나타냈다. 인장지배의 경우 철근의 영향력이 상대적으로 크기 때문에 비용과 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 단면들의 차이가 더욱 명확해진다. 내재에너지를 최적화시킨 단면은 비용을 최적화시킨 단면보다는 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 단면과 비슷한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 기둥단면의 크기를 줄이고 철근의 사용량을 늘리면 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 감소시킬 수 있다는 것도 알 수 있다.

3.3 비용 변화에 따른 내재에너지와 이산화탄소 배출량의 변화

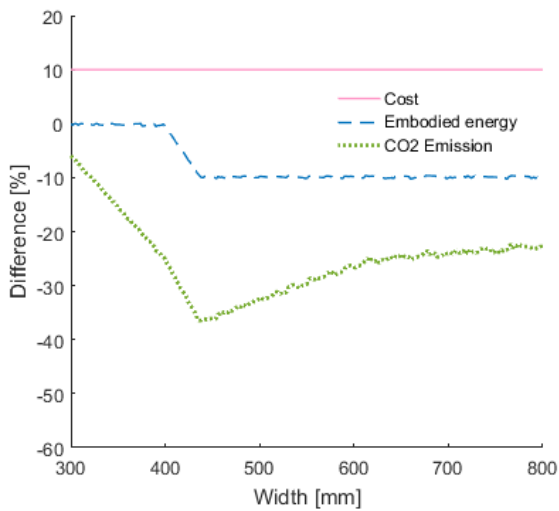
지금까지 철근 콘크리트 기둥의 설계시 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량과 같이 최적화하는 목적함수에 따라 최적 단면이 다르게 산정되는 것을 확인했다. 특히, 어느 정도의 비용 증가를 통해 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이제, 비용 증가에 따른 내재에너지 및 이산화탄소 배출량의 감소효과를 정량적으로 살펴본다. Fig. 7(a)~(b)은 각각 압축지배와 인장지배인 경우 비용을 10% 증가시켰을 때 내재에너지와 이산화탄소 배출량의 변화 추이를 보여준다. 비용의 10% 증가는 하나의 예시로 가정한 수치이며, 설계변수에 따른 철근과 콘크리트의 양이

연속적인 변화를 갖도록 가정하였기 때문에 철근과 콘크리트 재료의 변화없이 비용 증가가 가능하였다. 압축지배 상태에서는 내재에너지를 최적화시킨 단면과 비용을 최적화시킨 단면의 거동이 유사하기 때문에 단면 폭의 변화에 따라 내재에너지의 감소폭이 약 10% 정도로 일정하게 유지되고 있다. 그러나 이 경우 이산화탄소 배출량은 최대 약 35%까지 감소시킬 수 있으며, 단면 폭이 특정값 이상 커지면 감소폭은 소폭 줄었다. 인장지배 상태에서는 10% 비용 증가에 따른 내재에너지와 이산화탄소 배출량의 감소폭 차이가 압축지배인 경우에 비해 더 컸다. 내재에너지는 최대 약 25%까지 감소된 반면, 이산화탄소 배출량은 최대 약 55%까지 감소시킬 수 있었다.

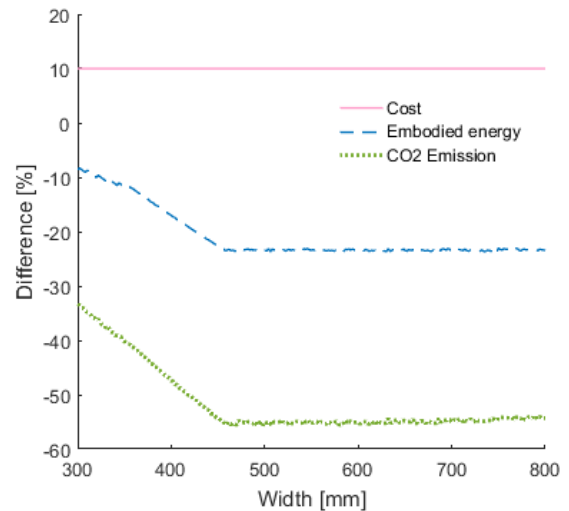
결과적으로 본 절의 해석결과는 철근 콘크리트 기둥 설계시 큰 비용의 증가없이 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 효과적으로 감소시킬 수 있고, 이러한 감소효과는 인장지배 상태일 때 더 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 설계실무에서 기둥은 인장지배 상태에 놓이는 경우가 많기 때문에 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있는 여지가 많다는 것이 예상 가능하다. 따라서 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해 상당한 비용 증가를 감수할 수밖에 없다는 선입견 대신, 앞으로 온실가스 거래제도와 같은 규제들이 현실화될 때를 대비한 지속가능 설계법을 적용하여 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 줄이고 이를 통해 얻을 수 있는 경제적 이익도 상당하다는 것을 주목할 필요가 있다.

4. 결 론

본 논문은 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최적화하면서



(a) Difference in embodied energy and CO₂ emission for compressive failure (crushing of concrete)



(b) Difference in embodied energy and CO₂ emission for tensile failure (yielding of steel)

Fig. 7 Reductions of embodied energy and CO₂ emission due to 10% increase in cost

철근 콘크리트 기둥단면을 설계할 수 있는 지속가능 설계법을 제시하였다. 철근 콘크리트 기둥은 외부에서 가해지는 축력과 모멘트의 비율에 따라 인장지배와 압축지배로 파괴모드가 나타나기 때문에 두 파괴모드를 모두 고려하기 위해 편심의 변화에 주면서 최적단면 설계를 수행하였다. 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량을 목적함수로 설정하고, 콘크리트 구조설계기준을 만족시키기 위한 구조조건을 적용하여 각각의 목적함수를 최적화한 최적단면을 산정한 후 다양한 분석을 수행하였다.

비용과 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 해석결과로부터 해석가능 영역과 철근비 분포를 확인했고, 최적단면이 파괴모드에 상관없이 큰 차이를 나타내는 것을 보였다. 내재에너지를 최적화시킨 해석결과는 압축지배인 경우 비용에 대한 최적화 결과와 비슷하게 나타났으나, 인장지배인 경우에는 오히려 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 결과와 유사하게 나타났다. 이것은 철근 콘크리트 기둥 설계시 파괴모드에 따라 철근과 콘크리트가 각 목적함수에 미치는 영향의 크기가 상이하기 때문이다. 내재에너지 또는 이산화탄소 배출량을 목적함수로 고려한 최적설계 결과가 기존에 비용만을 고려한 최적설계 결과와 다르게 나타난 것을 분석한 결과, 비용적인 측면만 고려한다면 철근의 사용량은 줄이고 콘크리트의 사용량을 늘리는 것이 합리적으로 보이지만, 지속가능 설계법의 관점에서 보면 적절한 양의 철근 사용을 통해 콘크리트의 사용량을 효율적으로 감소시키는 것이 내재에너지와 이산화탄소 배출량 감소에 유리하다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 논리에 따르면, 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해서는 철근 콘크리트 기둥의 공사비용이 어느 정도 증가되는 것을 감수할

수밖에 없다. 보다 구체적으로, 3.3절에서 제시된 바와 같이 10% 정도의 비용 증가를 통해 내재에너지는 최대 약 25%까지 감소시킬 수 있으며, 이산화탄소 배출량은 최대 약 55%까지 감소가 가능하다. 즉, 철근 콘크리트 기둥의 설계단계에서 지속가능 설계법을 고려한다면, 비용 증가를 통해 내재에너지 및 이산화탄소 배출량을 어느 정도 감소시킬 수 있는지에 대한 정량적 제어가 가능하다는 의미이다.

결과적으로 지속가능 설계법은 지속가능 개발이라는 개념을 바탕으로 발주자에게 다양한 선택권을 제공하며, 기존의 강도 설계법에 기초한 비용 절감에 집중하는 설계 방법에 대한 대안으로 활용될 수 있다. 또한, 내재에너지는 재료의 생산, 유통을 포함한 구조물의 생애주기 전과정과 연관되기 때문에 설계 단계에서부터 구조물의 전생애주기를 고려하는 효과를 얻을 수 있다. 다만, 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위해서는 어느 정도의 비용 증가가 불가피하기 때문에 비용을 얼마나 증가시켜서 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 얼마나 줄일 지에 대한 판단은 발주자와 설계자 그리고 시공자가 함께 고민할 필요가 있으며, 동시에 더 다양한 구조물로 지속가능 설계법을 확대·적용하는 노력이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A 2008248). 또한, 본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030040).

References

- Ashley, E., Lemay, L.** (2008) Concrete's Contribution to Sustainable Development, *J. Green Build.*, 3(4) pp.37~49.
- Cabeza, L.F., Barreneche, C., Miro, L., Morera, J.M., Bartoli, E., Fernandez, A.I.** (2013) Low Carbon and Low Embodied Energy Materials in Buildings: A Review, *Renew. & Sustain. Energy Rev.*, 23, pp.536~542
- CBPR** (2003) *Table of Embodied Energy Coefficients*, Centre for Building Performance Research, Wellington, New Zealand.
- CTBUH** (2009) Tall Building and Embodied Energy, *Counc. Tall Build. & Urban Habitat J. III*, pp.50~51.
- Davidovits, J.** (1993) Geopolymer Cements to Minimize Carbon-Dioxide Greenhouse Warming, *Ceram. Trans.*, 37, pp.165~182.
- Ding, G.K.C.** (2008) Sustainable Construction-The Role of Environmental Assessment Tools, *J. Environ. Manag.*, 86, pp.451~464
- Gartner, E.** (2004) Industrially Interesting Approaches to "Low-CO₂ Cements", *Cement & Concr. Res.*, 34(9), pp.1489~1498.
- Goggins, J., Keane, T., Kelly, A.** (2010) The Assessment of Embodied Energy in Typical Reinforced Concrete Building Structures in Ireland, *Energy & Build.*, 42, pp.735~744.
- Guerra, A., Newman, A.M., Leyffer, S.** (2011) Concrete Structure Design using Mixed Integer Nonlinear Programming with Complementarity Constraints, *SIAM J. Optim.*, 21(3), pp.833~863.
- Horvath, A.** (2004) Construction Materials and the Environment, *Annual Rev. Energy & Environ.*, 29, pp.181~204.
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., Acquaye, A.** (2013) Operational vs. Embodied Emissions in Buildings - A Review of Current Trends, *Energy & Build.*, 66, pp.232~245.
- IEA** (2005) *Key World Energy Statistics*, International Energy Agency, Paris, France.
- Korea Concrete Institute(KCI)** (2012) Concrete Structure Design Code, Korea Concrete Institute.
- Langston, Y.L., Langston, C.A.** (2008) Reliability of Building Embodied Energy Modeling: An Analysis of 30 Melbourne Case Studies, *Constr. Manag. Econ.*, 26(2), pp.147~160.
- Lippiatt, B.C.** (1999) Selection Cost Effective Green Building Products: BEES Approach, *J. Constr. Eng. & Manag.*, 125(6), pp.448~455.
- Lu, Y. Zhu, X., Cui, Q.** (2012) Effectiveness and Equity Implications of Carbon Policies in the United States Construction Industry, *Build. & Environ.*, 49, pp.259~269.
- Matlab 2016a Manual** (2016) https://www.mathworks.co.kr/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs** (2011) Guideline of CO₂ Emission Evaluation for Various Structures, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Nara Market** (2016) <http://shopping.g2b.go.kr/>
- 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
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A., Gonzalez-Vidoso, F.** (2009) CO₂ Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing, *Eng. Struct.*, 31(7), pp.1501~1508.
- Struble, L., Godfrey, J.** (2007) How Sustainable is Concrete?, *Int. Workshop on Sustain. Dev. & Concr. Tech.*, pp.201~211.
- Sahab, M.G., Ashour, A.F., Toropov, V.V.** (2005) Cost Optimization of Reinforced Flat Slab Buildings, *Eng. Struct.*, 27, pp.313~322.
- The White House** (2009) *Administration Announces U.S. Emission Target for Copenhagen*, President to Attend Copenhagen Climate Talks, Washington D.C., USA: Office of the Press Secretary.
- Thormark, C.** (2002) A Low Energy Building in a Life Cycle-Its Embodied Energy, Energy need for Operation, and Recycling Potential, *Build. & Environ.*, 37(4), pp.429~435.
- UNDP** (2007) *Buildings and Climate Change: Status, Challenges and Opportunities*, United Nations Development Program, New York, NY.
- Yeo, D., Potra, F.A.** (2015) Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through CO₂ Emission Optimization, *J. Struct. Eng.*, 141(3).
- Yeo, D., Gabbai, R.D.** (2011) Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through Embodied Energy Optimization, *Energy & Build.*, 43, pp.2028~2033.

Yoon, Y.C., Kim, K.H., Yeo, D., Lee, S.H. (2014)
Sustainable Design Method of Reinforced Concrete

Beam using Embodied Energy Optimization Technique,
J. Korean Soc. Civil Eng., 34(4), pp.1053~1063.

요 지

본 연구는 콘크리트 구조설계기준을 만족시키면서 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최적화할 수 있는 철근 콘크리트 기둥에 대한 지속가능 설계법을 제시한다. 지속가능 설계법은 기존의 비용절감 중심의 강도설계법에서 벗어나 철근 콘크리트 구조물의 환경 및 에너지 소비에 대한 부하를 최소화할 수 있게 해준다. 철근 콘크리트 기둥의 파괴모드는 가해지는 축력과 휨의 비율에 따라 인장지배와 압축지배로 나누어지기 때문에 각각의 지배모드에 대한 최적화 해석을 수행하였다. 다양한 단면형상과 철근량에 대해 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량을 최적화시킨 단면을 산출하고 그 특성을 비교·분석하였다. 최적화 해석결과에 대한 분석을 통해 비용을 약 10% 증가시킬 때 내재에너지는 약 25% 그리고 이산화탄소 배출량은 약 55%까지 감소시킬 수 있음을 보였다. 특히, 기둥이 인장지배 상태인 경우 압축지배 상태인 경우보다 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 더 큰 폭으로 감소시킬 수 있음을 보였다. 결과적으로 지속가능 설계법은 비용의 최소화 외에도 강도설계법에서 고려하지 않았던 내재에너지나 이산화탄소 배출량을 감소 또는 최적화하는 설계를 가능케 하여 지속가능개발의 개념을 철근 콘크리트 구조물 설계에 도입할 수 있도록 해주는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 철근 콘크리트 기둥, 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량, 최적화 해석, 지속가능 설계법