

내재에너지 최적화를 통한 철근 콘크리트 보의 지속가능 설계법

윤영철* · 김경환** · 여동훈*** · 이상호****

Yoon, Young-Cheol*, Kim, Kyeong-Hwan**, Yeo, DongHun***, Lee, Sang-Ho****

Sustainable Design Method of Reinforced Concrete Beam Using Embodied Energy Optimization Technique

ABSTRACT

This study presents a sustainable design method that optimizes the embodied energy of concrete beam based on the concept of sustainable development that effectively utilizes natural resource and energy within the range that our succeeding generation can afford to utilize. In order to get the flexural strength carrying the ultimate load, concrete beam sections are designed by optimization that consists of the embodied energy as a objective function and the requirements of design code as constrained conditions. The sustainable design can be used to minimize the embodied energy consumed in material production, construction, operation, demolition of the infrastructure. As a result of comparison of the cost and the embodied energy optimizations based on practical beam sections, it is shown that 20% embodied energy saving and 35% CO₂ emission saving are achieved by sacrificing 10% cost increase. The sustainable design method provides a new effective methodology that manages the strength design concept based on cost minimization together with economic feasibility and sustainability. In addition, the method is expected to be applied to more various structural design practices.

Key words : Sustainable design, Embodied energy, CO₂, Cost, Reinforced concrete beam, Optimization

초 록

본 연구에서는 자원과 에너지를 후손들까지 이용 가능하도록 확보하며 개발하는 지속가능개발 개념을 바탕으로 콘크리트구조기준을 만족시키면서 철근콘크리트 보의 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최적화 할 수 있는 지속가능 설계법을 제시한다. 극한하중을 견딜 수 있는 휨강도를 얻기 위한 콘크리트구조기준의 요구조건을 구속조건으로 설정하고 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 목적함수로 하는 최적화 단면설계를 수행했다. 지속가능 설계법은 건설재료의 생산, 구조물의 건설·관리·해체시 소비되는 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최소화할 수 있는 방안으로 활용될 수 있다. 실제 철근콘크리트 보를 대상으로 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최적화하여 얻은 단면과 공사비를 최적화하여 얻은 단면을 비교한 결과, 약 10% 정도의 비용증가를 통해 내재에너지와 이산화탄소 배출량을 각각 20% 정도와 35% 정도까지 감소할 수 있음을 보였다. 결과적으로 지속가능 설계법은 기존의 공사비 최소화를 근간으로 하는 강도설계법을 유지하면서 경제성과 지속가능성을 동시에 확보할 수 있는 설계수단을 제공해주며, 추후 보다 다양한 구조물의 설계로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 지속가능 설계법, 내재에너지, 이산화탄소 배출량, 공사비, 철근콘크리트 보, 최적화

* 정희원 · 교신저자 · 명지전문대학 토목과 부교수 (Corresponding Author · Myongji College · ycyoon@mjc.ac.kr)

** 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Yonsei University · kay@csem.yonsei.ac.kr)

*** NIST(National Institute of Standard and Technology) Research Engineer (NIST · donghun.yeo@nist.gov)

**** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Yonsei University · lee@yonsei.ac.kr)

Received April 10, 2014/ revised April 28, 2014/ accepted May 30, 2014

1. 서론

온실가스 배출권 거래제도(Emission Trading System)는 각 나라별로 온실가스인 이산화탄소(CO₂) 배출 감축의무와 연간 배출 허용량을 정한 뒤 할당량만큼 감축이 불가능한 기업이나 국가는 감축 목표를 초과달성한 기업이나 국가로부터 배출권을 사들여 목표를 달성토록 허용하고 있다. 또한, 미래세대의 필요를 충족시킬 수 있는 가능성을 손상시키지 않는 범위 내에서 현재 세대의 필요를 충족시키는 개발을 정의하는 지속가능 발전(sustainable development)은 온실가스 배출권 거래제도와 함께 더 이상 생소한 용어가 아니다(Ashley and Lemay, 2008; Struble and Godfrey, 2007). 건설분야에서도 선진국들을 중심으로 에너지 소비와 온실가스 배출을 감소하기 위한 공학적인 노력이 활발히 이루어지고 있다. 건설분야는 토지의 사용과 재료의 채취로 인한 천연자원의 소모가 많은 분야 중 하나인데, 한 예로 건물의 수명기간 동안 소비되는 내재에너지(embodied energy)를 최적화하는 설계를 통해 건설재료의 생산, 건물의 건설·관리·해체시 소비되는 에너지를 최소화하려는 시도가 이루어지고 있다(Wang et al., 2005; Paya et al., 2008; Paya-Zaforteza et al., 2009). 전 세계적으로 건물은 전체 에너지의 25%에서 40% 정도를 사용하는 것으로 보고되고 있는데(IEA, 2005), OECD (Organization for Economic Cooperation and Development)가 수행한 연구에 따르면, 주거와 상업용 건물은 OECD 국가들에서 소비되는 주요 에너지의 약 30% 정도를 소비하고, 이 국가들이 배출하는 온실가스의 약 30% 정도를 배출하고 있다(OECD, 2003). 이것은 건물의 사용수명 동안 이산화탄소 배출을 낮추기 위한 대부분의 노력이 건물을 운영하고 유지관리하는 데에 필요한 에너지(operating energy)를 감소하는 데에 초점이 맞추어져 있는 것과 쉽게 연관이 된다. 건축분야에서는 건물의 수명기간 동안 에너지 소비를 감소하고 사용의 효율성을 높이기 위한 노력이 설계 전문가나 건설회사들에 의해 다방면으로 이루어지고 있는데 반해 토목분야의 사회기반시설물들에 대해서는 이러한 노력이 상대적으로 부족한 것이 현실이다. 더욱이, 선진국들의 노력에 비추어 볼 때 우리나라의 현실은 이런 것들에 대한 개념정립도 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

사회기반시설물의 사용기간은 시설물의 전체 수명사이클(life cycle)의 일부분만 차지하기 때문에 생애주기비용(Life Cycle Cost; LCC) 평가와 같이 구조물의 전체적인 시공과정과 이용과정에 대한 장기적인 시각이 필요하다(Wang et al., 2005; Yohanis and Norton, 2002). 구조물의 건설에 앞서 건설재료의 처리·생산 과정에서 이미 에너지의 소비가 시작된다. 이러한 에너지 소비는 재료(광물자원)의 획득, 운송, 처리, 제작, 분배와 같은 수명사이클을 따라 순차적으로 발생하는데, 건설재료의 내재에너지는 이와

같은 순차적 에너지 자본(capital)을 정량화하기 위해 도입된 개념이다. 내재에너지는 이와 같은 순차적 에너지 외에도 건설현장에서 건설기간 동안 사용된 에너지, 구조물의 사용기간 동안 재료 또는 부재의 교체에 사용된 에너지, 구조물의 해체(철거)에 사용된 에너지도 반드시 포함해야 한다(Goggins et al., 2010; UNDP, 2007). 특정 건설재료에 대한 내재에너지를 정량화하는 것은 표준화된 방법으로 정확하게 계량하는 것이 어렵기 때문에 내재에너지의 해석에 대한 정확도와 신뢰도는 사용된 해석방법에 의존적일 수밖에 없다. 그러나 이러한 어려움에도 불구하고, 건설재료의 내재에너지는 한 국가의 전체 에너지 소비의 상당부분을 차지한다는 이유로 해외에서는 일반적인 건설재료의 내재에너지를 산정하고 활용하는 방법을 개발하는 일에 상당한 노력을 기울이고 있다. 예를 들어, 건물을 대상으로 한 연구인 UNDP (2007)에 따르면 영국, 아일랜드의 경우, 전체 에너지 소비의 10% 정도가 건물을 만든 재료에 함유되어 있다고 평가하고 있다. 내재에너지의 평가가 나라마다 큰 차이가 있을 수 있지만, 다른 연구에서는 전체 수명사이클에 대한 에너지에서 내재에너지가 적게는 5%에서 많게는 40% 정도까지 차지하는 것으로 보고하고 있다(Sartori and Hestnes, 2007). 더욱이, 에너지 소비 감소를 위한 노력의 초점이 에너지의 운용, 즉, 건물을 운영할 때 소비되는 에너지를 감축하는 데에 맞추어져 있기 때문에 에너지를 사용하지 않는 건물(net-zero energy building) 개발에 대한 노력이 구체화된다면 내재에너지 감소비율은 더욱 증가할 것이다.

콘크리트 배합에 사용되는 재료들은 포틀랜드 시멘트를 제외하면 상대적으로 낮은 내재에너지 값을 갖는다. 그러나 콘크리트는 건설분야에서 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 재료이기 때문에 철근 콘크리트 구조물에 대한 내재에너지의 총량은 매우 크다. 전 세계적인 콘크리트 생산이 1900년에 4,000만 m³에서 1997년에 64억 m³으로 증가한 것만 봐도 알 수 있다(CTBUH, 2003). 또한, 기존의 구조물에 사용된 콘크리트는 대부분 곧바로 재사용하기 어렵다는 것도 유의할 필요가 있다. 철근 콘크리트 구조물의 내재에너지를 감소하기 위해 저탄소 시멘트나 특수처리된 클링커의 사용, 시멘트의 재활용 같은 건설재료의 사용에 초점을 맞춘 방법도 연구가 필요하지만, 철근 콘크리트 구조물 설계단계에서도 에너지 사용 측면에서 보다 효율적인 재료의 사용이 이루어질 수 있도록 내재에너지 최적화 기법을 사용하는 것은 큰 의미가 있다(Davidovits, 1993; Gartner, 2004; Thormark, 2002). 이와 같은 설계는 기능과 효율성을 최대한 확보하면서 자연환경에 미치는 악영향을 없애거나 최소화하기 위한 지속가능 설계(sustainable design)와도 일맥상통한다.

지금까지 철근 콘크리트 구조물의 설계는 보편적으로 총공사비 또는 총중량에 대한 최적화를 수행하여 이루어져왔다. 그러나 지속

가능성(sustainability)의 향상을 위해 공사비 최소화 위주의 설계를 탈피하여 건설재료의 내재에너지를 최적화 할 수 있는 알고리즘을 구조물 설계에 반영할 필요가 있다. 해외에서는 이미 에너지 소비가 막대한 건설재료를 중심으로 지속가능 설계법을 개발하려는 시도가 유명 대학과 연구소들을 통해 이루어지고 있다. 한편, 국내에서 그 동안 건설산업의 이산화탄소 배출량을 감소시키기 위한 연구들이 수행되었지만 지속가능 발전의 개념과는 거리가 있다(Kim and Jang, 2013).

전술한 바와 같이 지금까지의 사회기반시설물의 설계는 소요강성을 확보한다는 전제하에 공사비를 최소화하는 개념의 설계가 주류를 이루어 왔기 때문에 지속가능 설계 분야는 많은 관심을 받지 못했다. 근래에 와서 턴키(Turn-key) 공사발주 시스템이 보편화되면서 규모가 큰 구조물을 중심으로 경관이나 랜드마크(landmark)적인 상징성을 부각시키는 설계 시공이 관심을 끈 것도 사실이지만, 근본적인 설계 개념은 바뀌지 않았다. 그러나 이제 건설분야에서도 기능과 효율을 극대화하는 동시에 후손을 생각하여 자연환경에 미치는 악영향을 최소화할 수 있는 지속가능 설계 개념을 도입할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존의 강도설계법의 요구사항을 구속조건으로 충족시키는 동시에 내재에너지를 목적함수로 최적화하여 철근 콘크리트 구조물을 설계할 수 있는 방법을 제시한다. 이어서, 제시된 방법으로 설계한 구조물을 기존의 총비용을 목적함수로 최적화하여 설계한 구조물과 비교·검증하여 지속가능 설계법의 특성과 효과를 분석한다. 또한, 이산화탄소 배출량을 최적화한 설계 결과도 추가적으로 제시하여 지속가능 설계법이 제공하는 단면의 특성과 효과를 다각도로 분석하여 경제적인 효과도 정량적으로 제시하고자 한다.

2. 내재에너지 최적화 설계

2.1 철근 콘크리트 보 설계

설계대상 구조물은 연장 L이고 직사각형 단면을 갖는 일반적인 철근 콘크리트 보이다. 보의 폭은 b, 높이는 h이고, 위험단면에서 계수 모멘트(M_u)와 계수 전단력(V_u)을 견뎌야 한다. 설계시 계수 모멘트와 계수 전단력과 함께 하중계수를 반영한 자중에 의한 모멘트(M_{sw})와 전단력(V_{sw})도 고려한다. 종방향 철근과 전단철근의 설계를 포함하는 보의 설계는 2012년에 개정된 콘크리트구조기준(2012)에 근거한다. 단, 지속가능설계의 결과 분석시 국내 설계기준과 비교를 위해 추가적으로 수행한 최적화 설계의 국외 기준은 ACI 318-08M (2008)을 따른다.

강도설계법에서 휨모멘트와 전단에 대한 설계가능범위(feasible design)는 다음의 식들로부터 결정된다.

$$M_u \leq \phi_b M_n \tag{1}$$

$$V_u \leq \phi_s V_n \tag{2}$$

여기서, $M_u = M_u + M_{sw}$, $V_u = V_u + V_{sw}$, M_n 과 V_n 은 공칭 휨강도와 공칭 전단강도를 나타낸다. ϕ_b 와 ϕ_s 는 휨과 전단에 대한 강도감소계수이다. 콘크리트구조기준의 요구조건을 만족시키는 적절한 단면이 정의된다는 가정 하에서 본 연구에서는 전체 내재에너지를 최소화한 설계가능범위와 전체 비용을 최소화한 설계가능범위를 결정하고 다양한 비교연구를 수행한다.

2.2 설계 변수(design variables)와 설계 파라메타

내재에너지를 최적화하기 위한 설계법 정립을 위해 설계 변수는 보의 폭 b, 높이 h, 종방향 철근의 면적 A_s , 전단철근의 면적 A_v (전단철근 간격 s)로 설정한다. Table 1에 설계 변수와 그 범위를 정리했다. A_s 와 A_v 는 보의 폭, 높이 같은 인자들에 의존하여 결정되기 때문에 사전에 특정한 범위가 정해질 수 없다. 실제 설계에서는 철근의 직경과 간격을 정할 때 정해진 규격의 값을 사용하지만, 본 연구에서는 A_s 와 A_v 를 편의상 연속된 값으로 다룬다. Table 2에는 내재에너지 최적화 설계과정에서 상수값으로 정의되는 설계 파라메타들이 정리되어 있다. 휨에 대한 강도감소계수 ϕ_b 는 하부 종방향 철근의 순인장 변형률에 의해 결정된다. 보의 압축연단 콘크리트 변형률이 극한변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달할 때 철근의 순인장 변형률(ϵ_t)이 0.002보다 작은 경우 단면은 압축지배로 분류되며, 이 때 종방향 철근의 응력은 탄성범위에 있고, 강도감소계수는 최소값인 $\phi_b = 0.65$ 가 적용된다. 반면, 압축연단 콘크리트의 변형률이 극한변형률에 도달할 때 철근의 순인장 변형률이 0.005보다 크거나 같은 경우 단면은 인장지배로 분류되며, 종방향 철근은 항복하고, 강도감소계수는 최대값인 $\phi_b = 0.85$ 가 적용된다. 압축지배와 인장지배의 전이구간을 나타내는 변화구간에서는 위의 두 강도감소계수 값(0.65와 0.85)을 선형보간하여 사용한다. 보 부재

Table 1. Design Variables and Ranges Used

Variables	Ranges
Width of compression face of member(b)	$300 \text{ mm} \leq b \leq 800 \text{ mm}$
Height of member(h)	$300 \text{ mm} \leq h \leq 800 \text{ mm}$
Area of longitudinal tension reinforcement (A_s)	Given M_u and $b \times h$, each value is calculated as per code KCI(Korean Concrete Institute) design code
Area of shear reinforcement within distance s(A_v)	Given V_u , s, and $b \times h$, each value is calculated as per code KCI design code

Table 2. Design Parameters and the Corresponding Values

Parameters	Values
Factored moment	$M_u = 320 kN \cdot m$
Factored shear force	$V_u = 210 kN$
Modulus of elasticity of steel	$E = 2 \times 10^5 MPa$
Specific mass of concrete	$\rho_c = 2400 kg/m^3$
Specific mass of steel	$\rho_s = 7850 kg/m^3$
Lightweight concrete factor	$\lambda = 1.0$
Shear strength reduction factor	$\phi_s = 0.75$
Flexure strength reduction factor	$0.65 \leq \phi_b \leq 0.85$
Ratio of depth of the Whitney stress block and the depth to the neutral axis	$\beta_1 = \begin{cases} 0.85, & f_{ck} \leq 28 MPa \\ 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28), & 28 < f_{ck} \leq 56 MPa \end{cases}$
Ultimate compressive strain of concrete	$\epsilon_{cu} = 0.003$
Length of the beam	$L = 8m$
Concrete cover including radius of fictitious bar of area A_s	$d_c = 75 mm$
Spacing of shear reinforcement	$s = 150 mm$

설계시 압축연단 콘크리트의 변형률이 극한변형률에 도달할 때 순인장 변형률은 0.004보다 작아서는 안된다. 이와 같은 규정은 결과적으로 보의 최대 철근량을 제한하게 된다. 더 상세한 설명은 콘크리트구조기준(Korea Concrete Institute (KCI), 2012)을 참고할 수 있다.

2.3 목적함수

철근 콘크리트를 구성하는 철근과 콘크리트의 내재에너지를 최적화하는 지속가능 설계법의 출발은 목적함수를 정의하는 것이다. 최적화 기법의 적용시 설계조건에 부합하기 위한 보 부재의 소요강도를 확보하는 것은 구속조건으로 고려되고, 내재에너지의 최소화는 목적함수를 통해 이루어진다. 목적함수는 내재에너지를 정의하는 방법에 따라 다양한 정의가 가능하지만, 본 연구에서는 단위길이당 전체 내재에너지를 의미하는 목적함수 g 를 Eq. (3)과 같이 정의한다. $g(b, h, A_s, A_v)$ 는 단면크기와 철근량을 설계변수로 사용한다(Yeo and Gabbai, 2011). 총비용을 최소화한 설계결과를 얻기 위해 단위길이당 보의 총비용(재료비)을 나타내는 목적함수 f 를 Eq. (4)와 같이 추가로 정의한다.

$$g(b, h, A_s, A_v) = \rho_s \left(A_s + \frac{A_v}{s} \right) E^s + \left(bh - A_s - \frac{A_v}{s} \right) E^c \quad (3)$$

Table 3. Cost Ratio(R) References

Reference	R	Comments
Paya-Zaforteza et al. (2009)	1.10	$f_{ck} = 35 MPa, f_y = 400 MPa$ (material costs only, 2007 prices)
Sahab et al. (2005)	0.91	$f_{ck} = 35 MPa, f_y = 460 MPa$ (material and placement costs, 2001 prices)
Guerra et al. (2011)	0.80	$f_{ck} = 28 MPa, f_y = 420 MPa$ (material and placement costs, year unknown)

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

여기서, C^c 는 단위 m^3 당 콘크리트 비용(KRW 또는 USD)이고, R 은 단위 m^3 당 콘크리트 비용에 대한 철근 100kg당 비용의 비율을 나타내며, s 는 전단철근의 간격이다. E^s 는 철근 1kg당 총에너지(MJ)이고, E^c 는 콘크리트 1 m^3 당 총에너지(MJ)이다. 한편, 이산화탄소 배출량을 최적화하는 설계에서는 철근과 콘크리트의 내재에너지를 나타내는 E^s 와 E^c 값 대신 이산화탄소 배출계수 값($E_{CO_2}^s$ 와 $E_{CO_2}^c$)을 대신 적용한다. 적절한 내재에너지 및 이산화탄소 배출계수 정의를 위해 E^c 과 E^s 값을 합리적으로 결정해야 한다. 콘크리트 1 m^3 의 가격과 철근 100kg의 가격이 대체로 비슷한 가격대를 형성하기 때문에 편의상 R 값을 이와 같이 정의하는데, Table 3에는 기존의 연구에서 사용된 R 값을 정리했다. R 값의 변동은 철근과 콘크리트(재료비)의 수요와 공급에 의한 가격변동이나 콘크리트의 타설비용과 철근의 배근비용이 포함되어 있는지의 여부가 중요한 요인이 된다. 본 연구에서는 내재에너지 값으로 $E^c = 3180 MJ/m^3$ 과 $E^s = 8.9 MJ/kg$ 를 사용하였고(CBPR, 2003), 이산화탄소 배출계수는 $E_{CO_2}^c = 421.09 kg CO_2/m^3$ 과 $E_{CO_2}^s = 0.41 kg CO_2/kg$ 를 사용하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 물론 건설재료에 대한 일반적인 데이터 베이스를 사용하는 것도 가능하다.

2.4 최적화 문제와 해석방법의 정식화

본 연구에서 지속가능 설계법의 정립을 위해 제안하는 최적화 문제는 다음과 같다. 최소화해야 하는 목적함수는

$$f(b, h, A_s, A_v) \text{ or } g(b, h, A_s, A_v) \quad (5)$$

이고, 구속조건은 다음과 같다.

$$\widehat{M}_u = \phi_v A_s f_y d \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_t} \right) \quad (6)$$

$$\max(0.25 \sqrt{f_{ck}}, 1.4) \frac{bd}{f_y} \leq A_s \leq \frac{0.85 \beta_1 f_{ck}}{f_y} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 0.004} \right) bd \quad (7)$$

$$\widehat{V}_u = \phi_s \left(\frac{\lambda \sqrt{f_{ck}} bd}{6} + \frac{A_v f_{yt} d}{s} \right) \quad (8)$$

$$A_v \geq \max(0.0625 \sqrt{f_{ck}}, 0.35) \frac{bs}{f_{yt}} \quad (9)$$

$$b_{\min} (mm) \leq b \leq b_{\max} (mm) \quad (10)$$

$$h_{\min} (mm) \leq h \leq h_{\max} (mm) \quad (11)$$

Eq. (6)에서 f_y (전단식의 경우 f_{yt})는 철근의 인장응력, 보의 유효깊이 $d = h - d_c$ 는 압축연단에서 종방향 인장철근 중심까지의 거리이다. 위의 식에서 보이는 추가적인 변수들은 앞 절과 Table 2에서 제시했다.

휨 하중에 대한 부재의 강도설계는 변형률 적합조건과 콘크리트와 철근의 내력에 대한 평형방정식을 풀어 Eq. (6)의 모멘트 설계강도(극한강도) 식으로부터 계산하며, 휨에 대한 계수하중은 편이상 설계 휨강도와 같도록, 즉, 안전율을 1로 고려한다. Eq. (7)의 인장 철근량(A_s)에 대한 조건은 휨부재의 최소, 최대 철근량을 제한한다. 주어진 계수 전단하중을 견디는 설계 전단강도는 콘크리트의 전단강도와 철근의 전단강도의 합으로 구성된 Eq. (8)을 사용하여 계산한다. Eq. (9)의 전단 철근량(A_v)에 대한 조건은 최소, 최대 전단철근량에 대한 요구사항을 나타낸다. Eqs. (10)-(11)의 b 와 h 에 대한 구속조건은 보의 폭과 높이에 대한 하한과 상한값을 정하기 위한 것이다. 본 연구에서 내재에너지를 최적화하는 지속가능 설계법은 최근 수치해석 프로그래밍 언어로 많이 사용되는 매트랩(Matlab R2009b manual) 프로그램을 이용하여 작성했다.

3. 지속가능설계 결과 분석

3.1 변수에 따른 설계가능(feasible design) 영역의 변화

정식화된 최적화 문제 알고리즘을 바탕으로 국내의 철근, 콘크리트 정보들을 활용하여 철근콘크리트 보의 최적화 해석을 수행했다. 설계가능 영역을 찾고 해당 영역에 대한 비용의 추이를 살펴보고 어떤 단면이 비용 측면에서 효율성이 높은지 파악하고자 한다. 국외 설계기준을 바탕으로 수행된 최적화 설계와의 비교를 통해 국내 설계기준에 의한 최적화 단면의 자리매김도 확인할 수 있다. Table 4에는 국내의 철근, 콘크리트 정보와 ACI 318-08M (2008)를 기준으로 사용한 국외의 철근, 콘크리트 정보가 비용비율(R)과 함께 정리되어 있다. 국토해양부(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)에서 제시한 콘크리트의 이산화탄소 배출계수는 압축강도가 21MPa와 24MPa일 때 밖에 제공되지 않으나, 콘크리트 강도에 대한 배출계수 차이가 크지 않고 국외의 경우와 합리적인 비교를 위해 압축강도를 28MPa로 가정했다. 한편, 국내 설계기준을 적용하는 경우 R 값이 1.25로서 Yeo and Gabbai (2011)가 사용한 0.8보다 조금 크다는 것을 주목할 필요가 있다.

Fig. 1은 설계변수 b 와 h 를 최소값 300mm에서 최대값 800mm로 설정한 해석가능 영역의 철근콘크리트 설계비용 분포를 보여주는데, 철근 및 콘크리트의 강도와 가격이 설계가능 영역과 비용산정에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 수 있다. Figs. 1(a) and 1(b)는 각각 국내 설계기준과 국외 설계기준을 사용한 결과이다. 국외 설계기준을 적용한 경우에 설계가능 영역이 조금 더 넓은 것은 콘크리트의 압축강도와 철근의 인장강도에 따라서 해석가능 영역이 달라지는데, 특히 콘크리트 압축강도가 커질 때 해석가능 영역이 증가하기 때문이다. 또한, R 값에 따라라도 해석가능 단면의 비용분포가 변하는데, 상대적으로 콘크리트의 가격보다는 철근의 가격에 더 민감하다. 두 경우 모두 단면이 증가할 때 b 보다는 h 를 증가시키는 것이 전체 철근콘크리트의 가격을 저감시키는데 도움이 되고, 철근콘크리트의 전체 가격이 산정될 때 철근 가격의 영향이 큰 것을 알 수 있다. Figs. 1(c) and 1(d)에는 해석가능영역에

Table 4. Domestic and Foreign Price Information for Concrete and Reinforcement Steel

Items	Domestic price (Nara market, 2013)	Foreign country's price (USA) (Yeo and Gabbai, 2011)
Concrete compressive strength	28 MPa	34 MPa
Reinforcement yield strength	400 MPa	420 MPa
Concrete cost	64,160 ₩(KRW)/m ³	130 \$(USD)/m ³ (138,450 ₩(KRW)/m ³)
Steel cost	800.85 ₩(KRW)/kg	1.04 \$(USD)/kg (1,107.6 ₩(KRW)/kg)
R	1.25	0.8

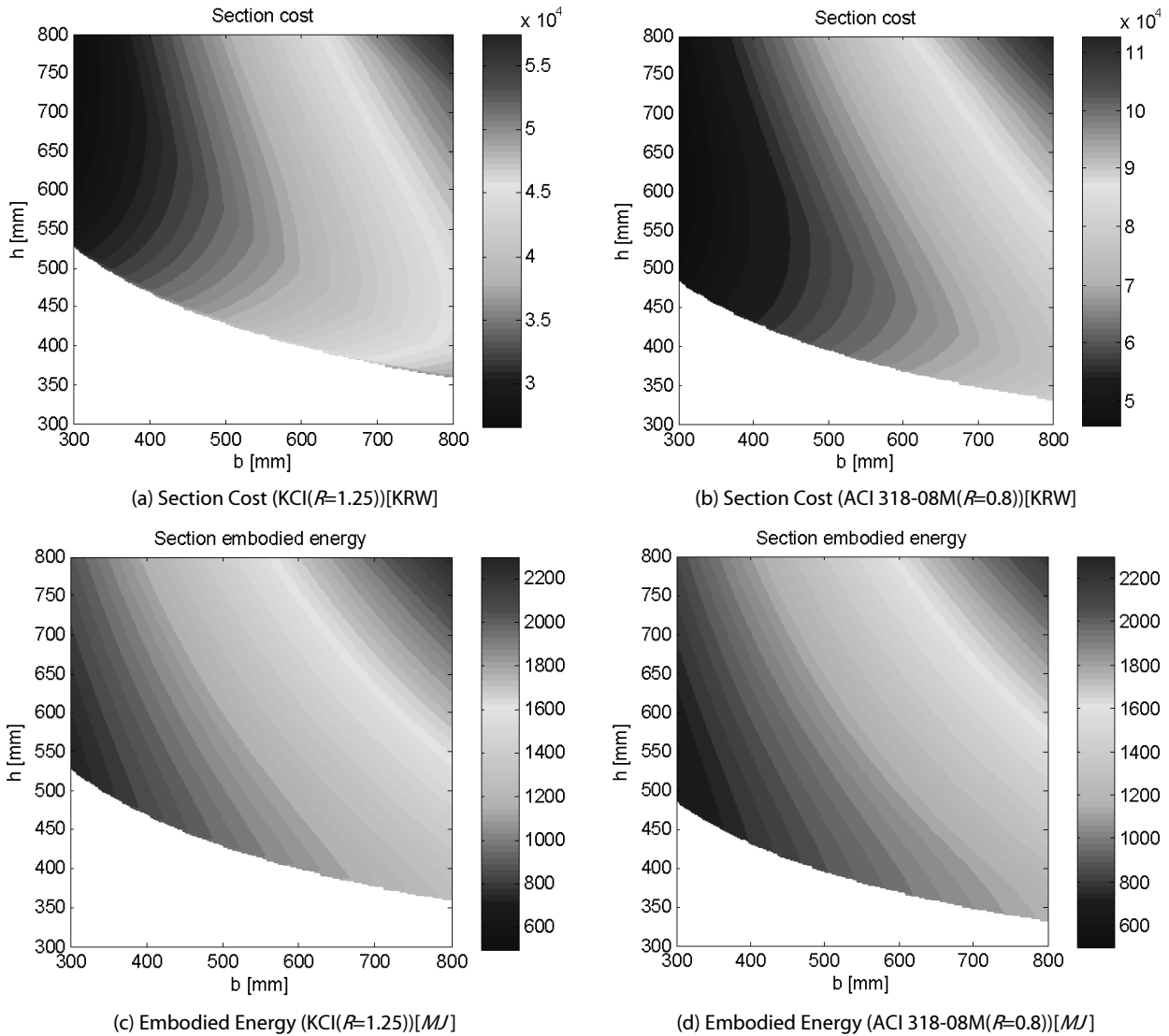


Fig. 1. Total Cost Plotted on the Feasible Design Area Based on KCI and ACI 318-08M Design Codes

내재에너지를 도시했으며, 내재에너지가 단면에 비례하여 증가하는 모습을 볼 수 있다. 국내 설계기준과 해외 설계기준으로 최적화는 경우 같은 내재에너지 식을 사용하기 때문에 전체적인 내재에너지 분포가 비슷한 양상을 보이지만, 국내기준의 경우 해석가능영역이 줄어들면서 약간의 차이를 나타내고 있다.

3.2 철근 항복강도와 콘크리트의 압축강도에 따른 최적단면 변화

앞 절의 국내 설계기준을 바탕으로 수행된 철근콘크리트 보 예제에 대하여 철근의 항복강도(f_y)와 콘크리트의 압축강도(f_{ck}) 변화에 따른 목적함수(비용, 내재에너지)별로 최적단면 해석을 수행한 결과를 Figs. 2 and 3에 도시하였다. 내재에너지와 이산화탄소

배출량에 따른 최적단면 해석결과는 거의 비슷한 양상을 보이기 때문에 내재에너지와 비용에 대한 해석 결과만 도시하였다.

Fig. 2(a)를 보면 비용을 최적화한 경우 철근의 항복강도가 증가할수록 최적단면의 면적이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 철근의 항복강도가 증가하면 철근콘크리트 보의 면적이 감소해도 적은 철근량으로 필요한 강도를 확보할 수 있기 때문이다. 그러나 내재에너지를 최적화한 Fig. 2(b)에서는 최적단면의 면적이 철근의 항복강도가 300MPa, 400MPa일 경우 비슷한 양상을 보이고, 500MPa일 경우 항복강도가 낮은 다른 해석결과들보다 조금 높은 값을 보인다. 즉, 철근의 강도가 증가할 때 b보다는 h가 더 많이 커져야 최적단면을 형성할 수 있다는 의미이다.

Fig. 3(a)는 콘크리트의 압축강도에 따른 비용 최적단면의 면적

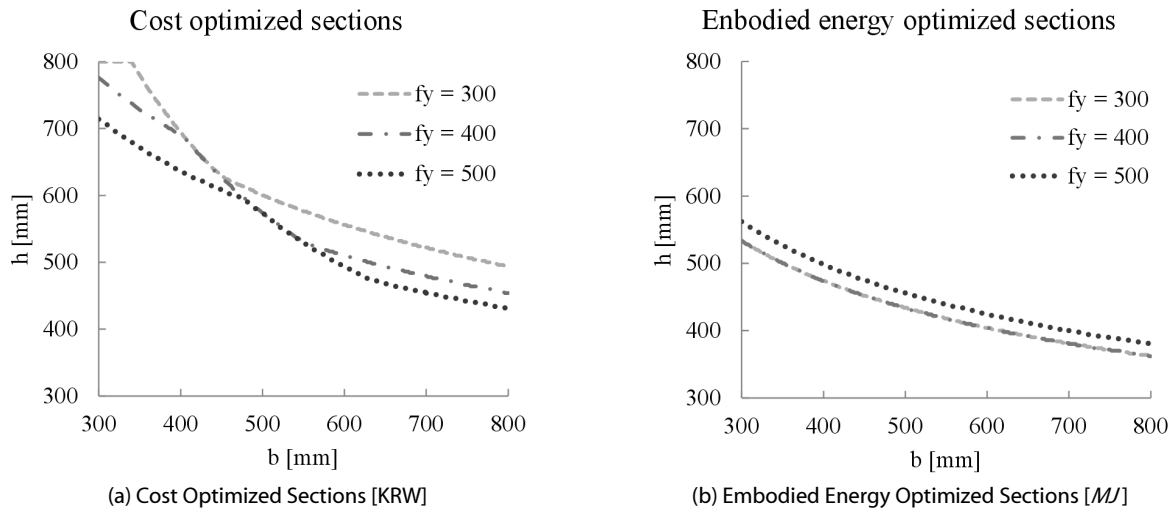


Fig. 2. Variation in h with b According to the Yield Strength of Rebar

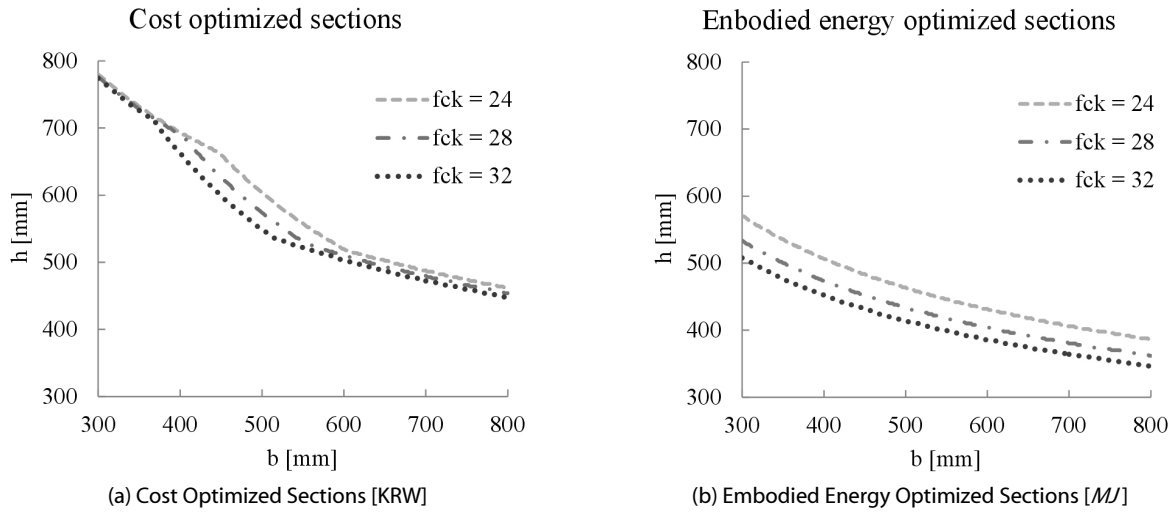


Fig. 3. Variation in h with b According to the Compressive Strength of Concrete

을 보여준다. 압축강도가 증가할수록 최적단면의 면적이 감소하는 모습은 철근의 항복강도에 따른 해석결과와 대체로 비슷한 양상을 보인다. 다만 압축강도에 따라 최적단면 면적의 급격한 감소가 시작되는 b 값에 차이가 발생한다. 반면, 폭 b 가 400mm 이하이거나 600mm 이상인 경우에는 콘크리트 압축강도의 영향이 상대적으로 작다. 즉, 비용의 경우 보의 폭과 높이의 비율이 상대적으로 낮거나 높으면 콘크리트나 철근의 강도에 덜 민감한 반면 폭과 높이가 비슷한 경우 더 민감하게 거동한다. Fig. 3(b)를 보면 내재에너지를 최적화한 경우 콘크리트의 압축강도가 증가할 때 내재에너지 최적 단면의 면적이 감소하는 것을 알 수 있다. 최적단면은 해석가능 영역의 최소값을 따라 형성되는데, 콘크리트의 압축강도가 증가할 경우 단면적이 감소하기 때문에 해석가능 영역이 증가하는 것과

관계가 있다.

3.3 철근비가 최적단면에 미치는 영향

본 절에서는 철근량과 콘크리트량 사이의 관계를 나타내는 철근비가 최적설계 단면에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. Fig. 4는 설계가능 영역에 대한 최적단면의 철근비를 도시한 것이다. 콘크리트량이 증가할 때 소요강도의 수준을 유지하기 위해 철근량이 감소될 수 있기 때문에 h 와 b 가 증가할 때 철근비가 감소하는데, b 보다는 상대적으로 h 가 증가할 때 철근비가 더 뚜렷하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 반대로 말하면 b 가 줄어들 때 휨강도 확보를 위해 상대적으로 더 많은 철근이 필요하다는 뜻이다. 구속조건으로 주어진 콘크리트구조기준의 규정을 만족할 때 최대 철근비는 약

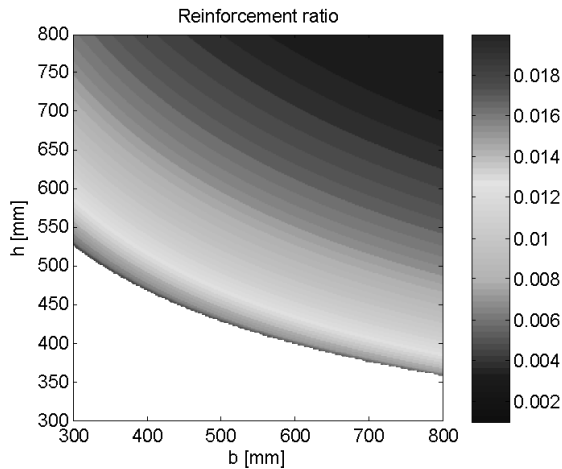


Fig. 4. Reinforcement Ratio Plotted on the Feasible Design Area

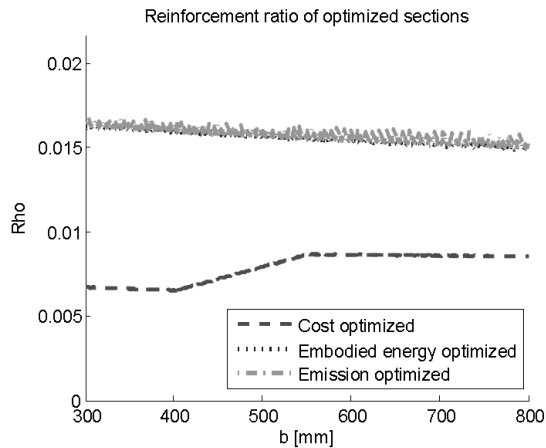


Fig. 5. Reinforcement Ratio of the Optimized Sections by Various Objective Functions

0.02정도인데, 설계가능 영역의 경계를 따라서 해당 철근비가 일정하게 유지되고 있다. 한편, Fig. 1(a)를 이와 같은 관점으로 해석하면, 작은 b 에서는 높이 h 가 증가해도 비용 변화가 크지 않은 것은 상대적으로 높은 철근비에 기인하고, 큰 b 에서는 상대적으로 낮은 철근비로 인해 h 값에 따라 비용이 증가하는 추세가 뚜렷하게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 바꾸어 말하면, 비용을 최적화하는 경우 h 가 감소할 때 비용감소 효과가 크지 않지만 b 가 감소하면 비용감소 효과가 뚜렷하게 나타난다. Figs. 1(a) and 4의 결과를 정리하면, 철근량이나 콘크리트량이 증가하게 되면 비용증가를 피할 수 없지만, 비용절감을 위해서는 철근비를 어느 정도 높은 수준으로 유지하면서 콘크리트 단면의 크기를 너무 크게 하지 않는 것이 도움이 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5은 목적함수 별로 최적단면에 대한 철근비의 변화를 보여준다. 내재에너지 또는 이산화탄소 배출량을 최적화한 단면이 비용

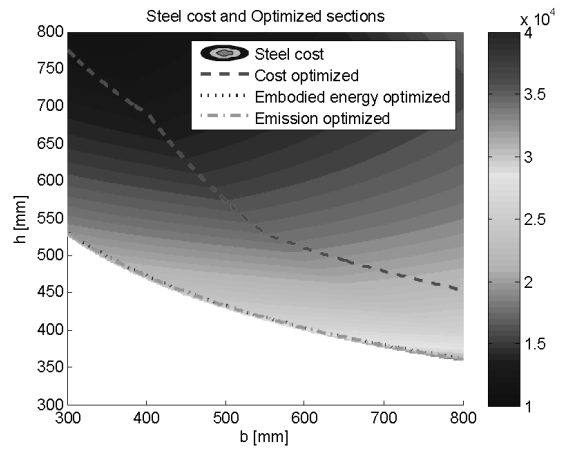


Fig. 6. Steel Cost Plotted on the Feasible Design Area and the Optimized Sections by Various Objective Functions [KRW]

을 최적화한 단면 보다 대체로 높은 수준의 철근비를 유지하고 있다. 내재에너지나 이산화탄소 배출량을 최적화한 단면들은 b 의 증가에 따라 완만한 철근비 감소를 보이는데 반해, 비용을 최적화한 단면은 일정구간에서 갑작스런 철근비의 증가가 발생한다. Fig. 6은 각 목적함수의 최적단면과 해석가능 영역 내에서 철근 비용(cost)의 분포를 함께 도시한 것인데, 비용 최적단면의 넓이가 갑자기 감소하는 부분과 철근 비용의 최소값이 이루는 궤적이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 즉, 철근 비용의 최소값에 따라서 최적단면의 일정구간에서 철근비가 증가하게 됨을 알 수 있다.

3.4 목적함수(내재에너지와 이산화탄소 배출량) 종류에 따른 차이

내재에너지와 이산화탄소 배출량을 최적화하는 경우, 콘크리트와 철근의 영향이 상대적으로 다르기 때문에 실제 최적화 영향에 차이가 발생해야 한다. 그러나 위의 해석들에서는 해석가능영역의 한계로 인하여 그 차이를 보여주지 못하였다. 본 절에서는 내재에너지와 이산화탄소 배출량이 고려된 목적함수의 차이를 보이기 위하여 콘크리트 압축강도(f_{ck})를 $21MPa$ 로, 철근의 항복강도(f_y)를 $300MPa$ 로 변경하여 해석을 수행하였다. 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도가 낮아지면 외력에 대한 강도를 확보하기 위해서 철근콘크리트 넓이가 증가하고, 그에 따라서 콘크리트와 철근의 영향력이 달라진다. Fig. 7(a)는 변경된 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도를 활용한 각 목적함수별 최적단면을 보여준다. 비용 최적 단면의 넓이가 많이 증가하여 해석가능 h 의 범위를 넘어가는 모습과, 내재에너지와 이산화탄소 배출량의 최적단면의 넓이에 차이가 발생하는 모습을 확인 할 수 있다. Fig. 7(b)에 도시된 철근비를 보면 그 차이를 확실하게 비교할 수 있다. 콘크리트에 대한 철근의 영향력이 이산화탄소 배출량 보다 내재에너지의 경우 더 높기

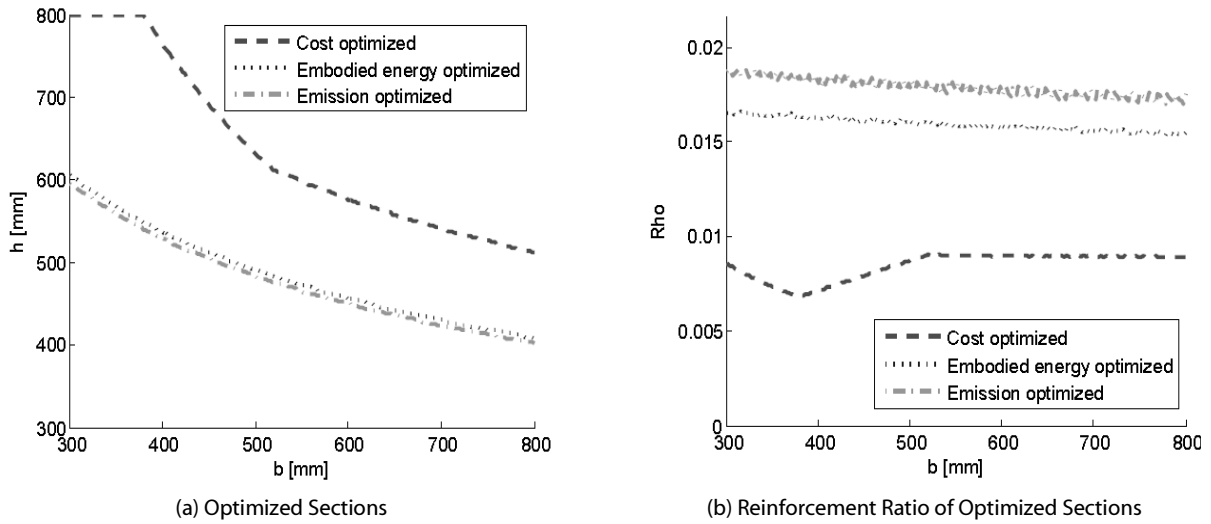


Fig. 7. Optimized Sections and Reinforcement Ratio by Various Objective Functions

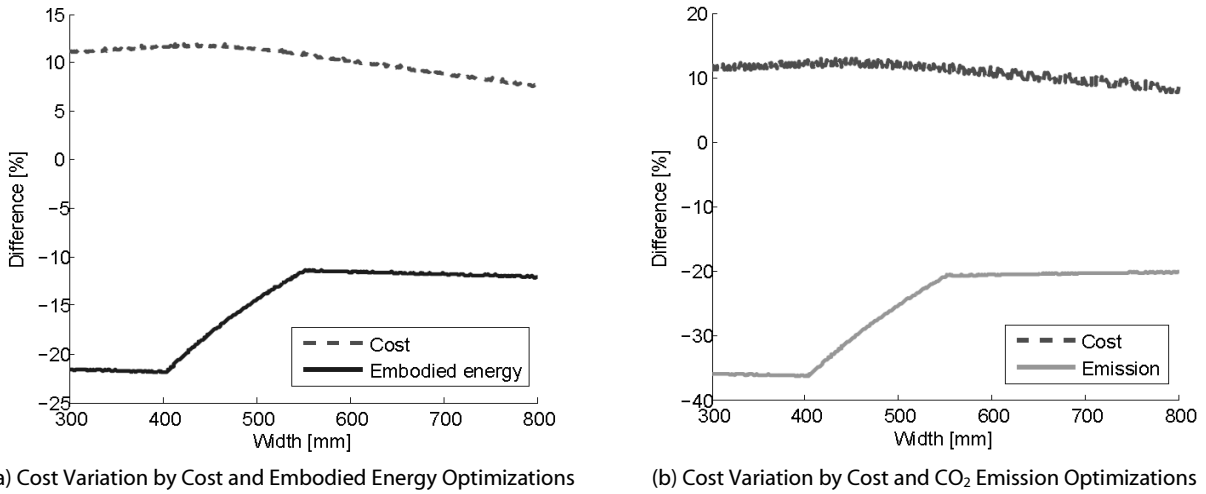


Fig. 8. Cost Variation by Cost, Embodied Energy, and CO₂ Emission Optimization According to b (a) for Cost and Embodied Energy Optimization (b) for Cost and CO₂ Emission Optimization

때문에 같은 강도를 유지하기 위하여 더 적은 철근을 사용해도 된다. 결국, 내재에너지 최적단면의 철근비가 이산화탄소 배출량 최적단면의 철근비 보다 더 낮은 값을 취하게 된다.

3.5 목적함수에 따른 증감비율

지금까지 살펴본 바와 같이 비용, 내재에너지 또는 이산화탄소 배출량 중 어느 것이 목적함수가 되느냐에 따라 최적단면이 차이를 보였다. 쉽게 말하면 비용을 최적화하면 내재에너지 및 이산화탄소 배출량을 손해 보게 되고, 반대로 내재에너지나 이산화탄소 배출량을 최적화하게 되면 비용에서 손해가 발생했다. Fig. 8은 국내 콘크리트구조기준에 따라 최적설계한 결과를 바탕으로 비용, 내재에너지, 이산화탄소 배출량의 변화를 나타낸다. 이 그림은 비용이

약 10% 정도 증가할 때, 내재에너지는 적게는 10%에서 많게는 20% 이상도 감소가 가능하고, 이산화탄소 배출량은 적게는 20%에서 많게는 35% 정도까지 감소시킬 수 있음을 보여준다. 반대로 말하면, 비용을 절약하기 위해서는 내재에너지 소모와 이산화탄소 배출량 증가를 감수해야한 한다는 말이다. 약 10%의 비용증가를 통해 내재에너지 소비와 이산화탄소 배출량을 각각 20%와 35% 가량 줄일 수 있다면 지속가능 설계법의 측면에서 상당한 의미를 가질 수 있다. 이러한 점은 설계자, 발주자 넓게는 국가까지도 상호 영향을 주며 설계 개념의 정립에 대해 관여할 수 있지만, 장애에는 지속가능 설계의 가치에 대한 고려가 반드시 중요하게 다루어져야 함을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트구조기준이 규정한 구조적인 설계요구 사항을 구속조건으로 만족시키면서 철근콘크리트 구조물의 내재에너지 및 이산화탄소 배출량을 최적화하여 단면을 설계할 수 있는 지속가능 설계법을 제시하였다. 실제 철근콘크리트 보에 대한 설계를 수행하여 지속가능 설계법을 통해 얻을 수 있는 잠재적인 이익을 정량적으로 분석했다. 즉, 공사비, 내재에너지, 이산화탄소 배출량을 각각 목적함수로 고려한 최적 단면설계를 수행하고 그 결과를 상호 비교함으로써 지속가능 설계법의 효과와 영향을 조사하였다.

철근콘크리트 보의 설계가능 영역을 결정하는 중요한 요소는 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도인데, 다양한 설계 파라메타 값들이 설계가능 영역에 속하는 구체적인 단면치수(보의 높이, 폭, 철근량 등)를 결정하는 요소로 작용했다. 비용을 최적화한 설계단면과 내재에너지를 최적화한 설계단면은 철근과 콘크리트의 비용비율(R) 값에 따라 차이를 나타냈다. 이것은 보의 설계시 콘크리트와 철근의 재료가격 뿐만 아니라 내재에너지(또는 이산화탄소 배출량)를 함께 고려할 경우 기존의 설계와 다른 패턴을 보인다는 것을 의미한다. 또한, 단순히 비용만을 최소화하면서 강도 확보에 집중하는 설계법에서 벗어나 지속가능개발 개념을 염두에 둔 지속가능 설계법의 활용이 의미있다는 것을 보여준다. 또한, 본 연구방법에서는 철근과 콘크리트와 관련된 비용에 변화가 생기면 비용비율이 바뀌고 최적단면에 변화가 발생하기 때문에 재료가격 변동을 탄력적으로 설계에 반영할 수 있고, 경제적인 측면도 지속가능성과 함께 고려가 가능하다.

철근콘크리트 보에 대한 지속가능설계를 통해 약 10% 정도의 비용증가가 발생할 수 있지만 내재에너지는 20% 정도까지 감소가 가능하다는 것을 보였으며, 이산화탄소 배출량의 경우에는 동일한 비용증가에 대해 35% 정도까지 감소시킬 수 있음을 보였다. 비용절약 측면만 고려한다면 내재에너지와 이산화탄소 배출량 증가를 피할 수 없다는 의미이다. 내재에너지는 건설재료의 처리·생산 과정에서 재료의 획득, 운송, 처리, 제작, 분배와 같은 순차적으로 발생하고 소비되는 에너지 자원을 정량화 해주기 때문에 건설기간 동안 사용된 에너지, 구조물의 사용기간 동안 재료 또는 부재의 교체에 사용된 에너지, 구조물의 해체에 사용되는 에너지까지 추가로 포함된다면 콘크리트 구조물의 생애주기 전체에 대한 장기적인 관점을 갖는 설계법으로 활용이 가능하다. 에너지 소비와 온실가스 배출감소를 위한 공학적인 노력이 다양하게 이루어지는 선진국들과 달리 지속가능 개발에 대한 관심이 부족한 국내 실정에서 국내의 구조기준을 만족시키면서 지속가능성 뿐만 아니라 비용, 이산화탄소 배출량까지 고려하여 단면을 설계할 수 있는 기법의 개발은 중요하다. 추후에는 본 연구에서 개발된 지속가능 설계법을 확장하

여 힘과 축력을 동시에 받는 부재를 포함한 다양한 설계분야에 확장하여 적용하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A2008248)

References

- ACI (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08M) and commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Ashley, E. and Lemay, L. (2008). "Concrete's contribution to sustainable development." *Journal of Green Building*, College Publishing, Vol. 3, No. 4, pp. 37-49.
- CBPR (2003). *Table of embodied energy coefficients*, Centre for Building Performance Research, Wellington (in New Zealand).
- CTBUH (2009). "Tall building and embodied energy." *Council of Tall Building and Urban Habitat Journal III*, pp. 50-51.
- Davidovits, J. (1993). "Geopolymer cements to minimize carbon-dioxide greenhouse warming." *Ceramic Transactions*, Wiley, Vol. 37, pp. 165-182.
- Gartner, E. (2004). "Industrially interesting approaches to 'low-CO₂' cements." *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol. 34, No. 9, pp. 1489-1498.
- Goggins, J., Keane, T. and Kelly, A. (2010). "The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland." *Energy and Buildings*, Elsevier, Vol. 42, No. 5, pp. 735-744.
- Guerra, A., Newman, A. M. and Leyffer, S. (2011). "Concrete structure design using mixed integer nonlinear programming with complementarity constraints." *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 21, No. 3, pp. 833-863.
- IEA (2005). *Key world energy statistics*, International Energy Agency, Paris (in French).
- Kim, B. S. and Jang, W. S. (2013). "A study on comparing the CO₂ emission estimating result for construction equipment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1675-1682.
- Korea Concrete Institute (KCI) (2012). *Concrete structure design code* (in Korean).
- MathWorks (2014). *Matlab manual*, Available at: 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* (in Korean).
- Nara market (2013). *Korea on-line e-procurement system*, Available at: <http://shopping.g2b.go.kr/>
- OECD (2003). *Environmentally sustainable buildings: Challenges*

- and Policies*, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris (in French).
- Paya, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F. and Hospitaler, A. (2008). "Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley, Vol. 23, No. 8, pp. 596-610.
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A. and Gonzalez-Vidosa, F. (2009). "CO₂ optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing." *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 31, No. 7, pp. 1501-1508.
- Sahab, M. G., Ashour, A. F. and Toropov, V. V. (2005). "Cost optimization of reinforced concrete flat slab buildings." *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 27, No. 1, pp. 313-322.
- Sartori, I. and Hestnes, A. G. (2007). "Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: A Review Article." *Energy and Buildings*, Elsevier, Vol. 39, No. 3, pp. 249-257.
- Struble, L. and Godfrey, J. (2007). "How sustainable is concrete?" *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, pp. 201-211.
- Thormark, C. (2002). "A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation, and recycling potential." *Building and Environment*, Elsevier, Vol. 37, No. 4, pp. 429-435.
- UNDP (2007). *Buildings and climate change: Status, Challenges and Opportunities*, United Nations Development Program, New York, N.Y.
- Wang, W., Zmeureanu, R. and Rivard, H. (2005). "Applying multi-objective generic algorithms in green building design optimization." *Building and Environment*, Elsevier, Vol. 40, No. 11, pp. 1512-1525.
- Yeo, D. and Gabbai, R. D. (2011). "Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization." *Energy and Buildings*, Elsevier, Vol. 43, No. 8, pp. 2028-2033.
- Yohanis, Y. G. and Norton, B. (2002). "Life cycle operational and embodied energy for a generic single-story office building in the UK." *Energy*, Elsevier, Vol. 27, No. 1, pp. 77-92.