

협동 최적화 방법을 이용한 강상자형교의 생애주기비용 최적설계 Optimum Life-Cycle Cost Design of Steel Box Girder Bridges Using Collaborative Optimization

조 효 남* 민 대 흥** 권 우 성***
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Kwon, Woo-Sung

ABSTRACT

In this study, large-scale distributed design approach for a life cycle cost (LCC) optimization of steel box girder bridges was implemented. A collaborative optimization approach is one of the multidisciplinary design optimization approaches and it has been proven to be best suited for distributed design environment. The problem of optimum LCC design of steel box girder bridges is formulated as that of minimization of the expected total LCC that consists of initial cost, maintenance cost, expected retrofit costs for strength, deflection, and crack. To discuss the possibility of the application for the collaborative optimization of steel box girder bridges, the results of this algorithm are compared with those of single level algorithm. From the numerical investigations, the collaborative optimization approach proposed in this study may be expected to be new concepts and design methodologies associated with the LCC approach.

1. 서 론

최근 컴퓨터가 급속히 발전하고 공학문제의 복잡성, 전문성이 요구됨에 따라 다분야 최적설계(Multidisciplinary Design Optimization; MDO)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이전에 주로 의존해 왔던 순차적인 설계방법은 몇몇의 최고 전문가의 직관에 의해 설계 초기치가 결정되면, 각 세부 분야의 전문가들이 분야(disciplinary)별 해석을 순차적으로 수행하게 된다. 하지만 이러한 과정에서 분야별로 서로 상충하는 현상이 발생하게 되며, 피드백을 통한 재해석을 시도하게 된다. 이러한 고전적인 순차적 설계방법은 1980년대 중반 이후 동시공학(concurrent engineering)개념의 등장으로 필요 없는 피드백을 줄여 구조시스템 전체의 성능지수를 목표로 하면서 각각의 세부설계분야에서 독립적인 설계를 효과적으로 수행하고자 하는 방법이 모색되었고, 이와 함께 Balling(1996), Braun(1996) 등에 의해서 설계공간의 분해에 따른 다단계 최적화 기법들에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 특히 최근에는 미국의 항공우주 및 기계 분야를 중심으로 다단계 최적설계에 대한 다양한 접근방법이 제안되었으며 그 중에서도 협동 최적화 방법은 대규모의 공학문제의 분산처리를 효율적으로 적용할 수 있는 최적설계 이론으로 발전하였다. 기존의 분야별 최적화인 경우 각각의 설계환경에서 설계가 독립적으로 이루어지므로 over-the-wall의 한계를 가지고 있었으나 협동 최적화(collaborative optimization) 방법의 경우는 각각의 분야에서의 해석과 설계를 고려하여 전체시스템의 성능지수를 최적화하므로 기존의 최적화 과정에서의 한계성을 극복하였으며 각각의 분야에 대해서 전문가의 의견

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수

** 학생회원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사수료

*** 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

을 수립하여 확장을 용이하게 해줄 수 있게 하였다. 이러한 전산화설계 환경과 최근 구조수명간 총기대비용의 최적설계가 설계의 새로운 패러다임으로 부각되고 있는 상황에서 본 연구에서는 강상자형 교량과 같이 건설비용뿐만 아니라 장기적인 유지관리가 매우 중요한 구조물에 대해 초기비용 이외에도 바닥판과 주형의 강도와 사용성에 대한 기대파손비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 비용함수모형을 이용하여 이를 협동 최적화 방법에 적용시키는 기본적인 모델을 제시하였다.

2. 최적 LCC 설계문제의 정식화

2.1 협동 최적화 방법

협동 최적화 방법은 다분야 최적 설계 문제를 풀기 위해 고안된 접근방법으로서 전체 문제를 하나의 시스템 레벨과 다수의 서브 시스템 레벨로 분해하여 각 레벨에서 최적화를 수행하게 된다. 즉, 각각의 서브 시스템 레벨에서는 자신의 분야와 관련된 해석 및 최적화를 수행하며, 시스템 레벨은 이러한 서브 시스템 레벨들을 조정하여 전체 문제의 최적해를 얻을 수 있도록 최적화를 수행한다. 그림1은 이러한 협동 최적화 접근방법의 기본 구조를 나타낸다. 그림 1의 시스템 레벨에서는 서브 시스템 레벨들이 공유하는 변수들로서 목표변수(target variable)를 구성하고 이를 각 서브 시스템 레벨로 전달한다. 또한 각 서브 시스템 레벨로부터 최적화 결과를 전달받은 후 시스템 레벨에서는 주어진 최적화 문제의 목적함수를 최소화하는 방향으로 목표 변수를 개선시킨다. 개선된 목표변수는 다시 각 서브 시스템 레벨로 전달된다. 이와 같은 과정은 최적해가 얻어질 때까지 반복된다. 서브 시스템 레벨은 시스템 레벨로부터 목표변수를 전달받으며 자신의 제약조건(disciplinary design constraint)을 만족하면서 최대한 근접하도록 최적화를 수행한다. 최적화 수행결과 시스템의 적합조건(compatibility)을 나타내는 모순함수(discrepancy function)의 최소값과 목표변수에 대한 설계 민감도 정보를 시스템 레벨로 전달하게 된다.

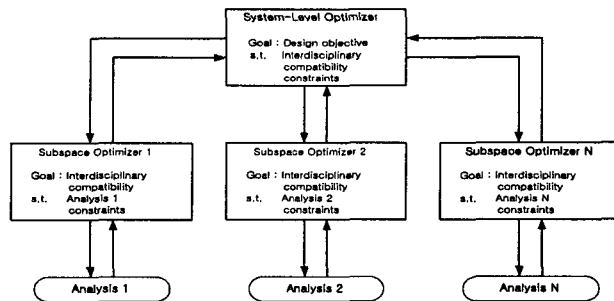


그림 1. 협동 최적화 방법의 기본 구조

2.2 시스템 레벨

구조물의 설계에 있어 비용해석에 관계된 결과값들이 비용의 가치항으로 표현될 때 기대비용이라 할 수 있으며, 이러한 LCC를 최소화하는 것이 바람직하다[Melchers, 1987]. 따라서, 시스템 레벨에서의 목적함수는 총기대비용(Expected Total LCC)을 최소화하기 위한 비용함수로 정하였고 본 연구에서는 안전에 가장 지배적인 강도파손에 대한 보강기대비용, 사용성에 대한 보강기대비용, 유지관리비용 그리고 초기비용에 국한하여 바닥판과 주형에 대하여 정식화하였다. 좀 더 구체적으로 살펴보면 바닥판의 균열과 주형의 강도 혹은 사용성 파손이 동시에 일어날 경우 각각을 따로 보수하며 주형의 강도와 사용성이 동시에 파손될 경우는 강도에 대해서만 보수를 하고 강도와 사용성, 균열이 동시에 파손될 경우는 균열과 강도에 대해서만 보수를 하는 것으로 가정하였다. 그리고 이와 같은 목적함수의 정식화를 용이하게 하기 위해서 파손확률에 대한 벤다이어

그림을 그림 2에 나타내었다. 또한 설계변수는 목표변수들로 이루어져 있으며 설계 제약조건은 각각의 서브 시스템 레벨에서 최소화된 모순함수가 0이 되도록 하는 등제약조건을 이용하였으며 이에 대한 정식화는 식 (1)에 나타내었다.

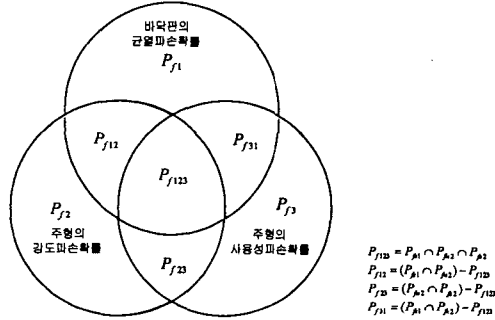


그림 2. 파손확률의 벤다이어그램

설계변수 : Interdisciplinary variable($C_N, C_L, P_{fs1}, P_{fd2}, P_{fs2}, D$)

$$\begin{aligned} \text{목적함수} : f(z) = & C_N + C_L + C_{M1} + C_{M2} + P_{f1}(C_{fsd1} + C_{fsi1}) + P_{f2}(C_{fud2} + C_{fud2}) + P_{f3}(C_{fsd2} + C_{fsd2}) + \\ & P_{f12}(C_{fsd1} + C_{fsi1} + C_{fud2} + C_{fud2}) + P_{f23}(C_{fud2} + C_{fud2}) + P_{f31}(C_{fsd1} + C_{fsi1} + C_{fsd2} + C_{fsd2}) + \\ & P_{f123}(C_{fsd1} + C_{fsi1} + C_{fud2} + C_{fud2}) \end{aligned}$$

$$\text{제약조건} : d_1 = 0, d_2 = 0 \tag{1}$$

여기서,

C_N, C_L = 바닥판과 주형의 초기비용; C_{M1}, C_{M2} = 바닥판과 주형의 유지관리비용; C_{fsd1} = 바닥판의 사용성 파손에 대한 직접비용; C_{fsi1} = 바닥판의 사용성 파손에 대한 간접비용; C_{fud2}, C_{fsd2} = 주형의 강도 및 사용성 파손에 대한 직접비용; C_{fud2}, C_{fsd2} = 주형의 강도 및 사용성 파손에 대한 간접비용; P_{fs1} = 바닥판의 사용성에 대한 파손확률; P_{fd2}, P_{fs2} = 주형의 강도 및 사용성에 대한 파손확률; D = 바닥판의 두께; d_1, d_2 = 서브 시스템 레벨 1, 2에서의 모순함수.

2.3 서브 시스템 레벨

서브 시스템 레벨은 크게 바닥판과 주형으로 나눌 수 있으며 각각의 레벨에서의 설계변수는 지역변수(그림 3, 4)와 광역변수로 구성되어 있다. 목적함수는 시스템의 적합조건을 나타내는 모순함수를 최소화하는 방향으로 해를 구한다. 지역변수로는 바닥판인 경우 철근량으로 선정하였고 주형의 경우는 정·부모멘트 구간에 따라 변단면을 고려하여 각 단면그룹에 대한 상부 플랜지의 두께와 하부 플랜지의 두께, 그리고 웨브의 두께로 정하였다. 또한 제약조건은 각각의 시스템에서의 구조응답에 대한 항목으로서 바닥판인 경우는 강도 설계법을 기준으로 하였고 주형인 경우는 허용응력설계법을 기준으로 하여 표 1과 같이 정식화하였다. 다음은 레벨 1(바닥판)에서의 정식화를 나타내었다.

설계변수 : Interdisciplinary variable(D), Disciplinary variable(A_s)

$$\text{목적함수} : d_1 = (C_N - C_N')^2 + (P_{fs1} - P_{fs1}')^2 + (D - D')^2$$

제약조건 : $g_1 \leq 0$ (2)

레벨 2(주형)에서의 정식화를 나타내면 다음과 같다.

설계변수 : Interdisciplinary variable(D), Disciplinary variable(t_{fu} , t_{fl} , t_w)
 목적함수 : $d_2 = (C_2 - C_2')^2 + (P_{fsl} - P_{fsl}')^2 + (P_{fsl} - P_{fsl}')^2 + (D - D')^2$
 제약조건 : $g_2 \leq 0$ (3)

여기서,
 C_1', C_2' = 바닥판과 주형의 목표초기비용; P_{fsl}' = 바닥판의 사용성에 대한 목표파손확률; P_{fsl}, P_{fsl}' = 주형의 강도 및 사용성에 대한 목표파손확률; D' = 바닥판의 목표두께.

표 1. 콘크리트 바닥판 및 주형의 제약조건

구분	설계제약조건	기호설명
콘크리트	휨모멘트 $G_1 = \gamma M_n / \phi M_u - 1 \leq 0$	M_n : 공칭모멘트, M_u : 계수모멘트 γ : 하중증가계수, ϕ : 강도감소계수
	최대철근비 $G_2 = \rho / \rho_{max} - 1 \leq 0$	ρ : 사용 철근비 $\rho_{max} = 0.85 \times 0.75 \times \beta_1 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right)$
바닥판	최소철근비 $G_3 = 1 - \rho / \rho_{min} \leq 0$	ρ : 사용 철근비, $\rho_{min} = \frac{0.8\sqrt{f_{ck}}}{f_y} \times b_w d \geq \frac{14}{f_y}$
	바닥판 최소두께 $G_4 = h_{min} - h \leq 0$	h : 바닥판 사용높이, h_{min} : 바닥판 최소두께
주형	조합응력 $G_1 = f_{cu} / f_{ca} - 1 \leq 0$ $G_2 = f_{su} / f_{sa} - 1 \leq 0$ $G_3 = f_{sl} / f_{sla} - 1 \leq 0$	f_{cu} : 콘크리트 바닥판 상단의 휨응력 f_{ca} : 콘크리트 바닥판 상단의 허용휨응력 f_{su}, f_{sl} : 주형 상·하단의 휨응력 f_{sa}, f_{sla} : 주형 상·하단의 허용휨응력
	전단응력 $G_4 = f_v / f_{va} - 1 \leq 0$	f_v : 설계단면의 전단응력, f_{va} : 허용전단응력
	합성응력 $G_5 = \left(\frac{f_b}{f_{ba}} \right)^2 + \left(\frac{f_v}{f_{va}} \right)^2 - 1.2 \leq 0$	f_b : 각 단면의 작용휨응력, f_{ba} : 각 단면의 허용휨응력 f_v : 각 단면의 작용전단응력, f_{va} : 각 단면의 허용전단응력
	활하중처짐 $G_6 = \delta / \delta_a - 1 \leq 0$	δ : 활하중에 의한 처짐, δ_a : 허용처짐
	최소두께 $G_7 = t_{min} - X_i \leq 0$	t_{min} : 최소두께, x_i : 설계변수(상·하플랜지와 웨브두께)

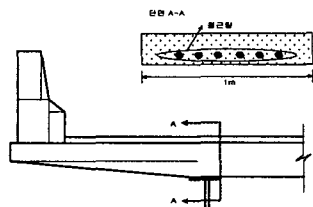


그림 3. 바닥판의 지역설계변수

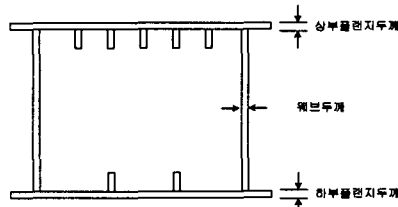


그림 4. 주형의 지역설계변수

3. 한계상태모형 및 신뢰성 해석

3.1 한계상태 모형

LCC 함수에 정의된 구조물의 파손확률을 고려하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 주형의 강도파손인 경우 휨모멘트에 의한 플랜지의 파손과 전단력에 의한 웨브의 파손으로 정의하고 식(4), (5)에 나타내었으며 주형의 활하중 처짐에 대한 사용성 한계상태모형은 식(6)에 나타내었다. 그리고 바닥판인 경우 휨모멘트에 의한 슬래브의 균열에 대한 사용성 한계상태모형을 식(7)에 정의하였다.

$$g(\cdot) = f_{MR} - (f_{MD} + f_{ML}) \quad (4)$$

$$g(\cdot) = v_{SR} - (v_{SD} + v_{SL}) \quad (5)$$

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_i \quad (6)$$

$$g(\cdot) = M_{CR} - (M_{MD} + M_{ML}) \quad (7)$$

여기서,

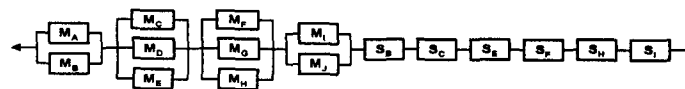
f_{MR} = 실공칭 휨응력; v_{SR} = 실공칭 전단응력; f_{MD}, f_{ML} = 실작용 사하중/활하중에 의한 휨응력; v_{SD}, v_{SL} = 실작용 사하중/활하중에 의한 전단응력; δ_{all} = 활하중 허용처짐(L/500); δ_i = 활하중에 의한 처짐; M_{CR} = 콘크리트 바닥판의 균열모멘트; M_{MD}, M_{ML} = 콘크리트 바닥판의 실작용 사하중/활하중에 의한 모멘트.

3.2 신뢰성 해석

본 연구에서는 제안한 한계상태함수의 요소신뢰성 해석을 위하여, 랜덤변수의 추정, 평균과 분산 또는 공분산에 의해 표준화된 공간에서 파괴면 경계역까지의 최소거리인 신뢰성지수 β 를 구하는 개선된 1계 2차 모멘트법(AFOSM)을 사용하였다. 또한 요소신뢰성 해석결과를 이용해 교량의 주요요소의 파괴모드로 구성된 직·병렬시스템 해석시, 대상 교량의 파손확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다. 그림 5는 본 연구에서 적용된 4경간 연속보의 파괴 메카니즘과 직·병렬시스템 모델을 보여주고 있다.



(a) 파괴 메카니즘



(b) 직·병렬시스템 모델

그림 5. 체계 신뢰성 해석모델

4. 적용에 및 고찰

4.1 대상구조물의 일반사항

본 연구에서 제안한 LCC 최적설계를 기존의 설계방법과 비교·분석하기 위하여 실제 허용응력설계법(ASD)으로 설계된 경부고속도로 하행선 상의 금강 3교를 본 연구에 적용하였다. 실제 설계된 자료를 바탕으로 정·부모멘트부에 따라 8개의 변단면을 갖도록 선정하였으며 대상교량의 형식은 4경간 연속 강상자형교로서 지간은 200m(50m+50m+50m+50m)이고 폭원은 12.6m인 2연 박스이며 설계하중은 DB24, DL24를 적용하였다. 그외 대상구조물의 사용재료는 표 2에 나타내었다.

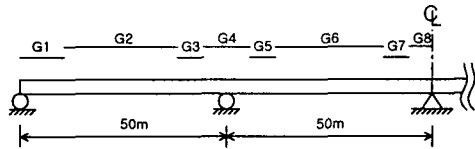


그림 6. 종방향 단면그림

표 2. 대상구조물의 사용재료

강재 (주부재)	사용강재	SM490
		항복응력(kg/cm ²)
	허용인장응력(kg/cm ²)	1,900
	허용전단응력(kg/cm ²)	1,100
	탄성계수(kg/cm ²)	2.0×10 ⁸
콘크리트	설계기준강도(kg/cm ²)	270

4.2 생애주기비용의 계산

4.2.1 초기비용 및 유지관리비용의 정식화

초기비용은 교량의 설계와 시공 그리고 개통전 하중시험에 관련된 비용이다. 이 중에서 시공비용의 산정은 그와 관련된 도로공사 실시설계기준[1997]을 참고해 콘크리트 구조인 경우 단위부피당 44.7만원, 강재주형의 경우 단위중량당 192만원, 철근의 경우 단위중량당 165만원으로 정하였다. 또한 설계비용과 하중시험에 관한 비용은 각각 시공비용의 7%와 3%로 정하였으며 다음과 같이 정식화하였다.

$$C_0 = C_{0D} + C_{0C} + C_{0T} \quad (8)$$

여기서,

C_0 = 초기비용; C_{0D} = 설계비용(건설비용의 7%); C_{0C} = 건설비용; C_{0T} = 하중시험비용(건설비용의 3%)

유지관리비용(C_M)은 국내의 교량의 건설계획시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상교량에 적합한 사례 등을 참조하면 산출되지만 관련자료[시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령, 1995]에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다.

4.2.2 보강비용의 정식화

보강비용은 보수·보강과 같은 직접비용과 도로이용자비용 및 간접적 지역 경제손실비용과 같은 간접비용으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 주형의 강도파손과 파다처짐 그리고 바닥판의 균열파손 시 직접비용을 산정하기 위해 전문가의 견해, 각종 공사자료에 근거하여 교량의 보수·보강 방법 및 공사기간을 정하였고 표 3에 나타내었다.

표 3. 보강비용 계산을 위한 보강방법 및 공사기간

파손종류	바닥판	주형	
		사용성(균열)파손	강도파손
적용공법	에폭시주입	부분교체	프리스트레싱
공사기간	2주	6달	2주

간접비는 크게 도로이용자 비용과 간접적 지역경제 손실비용으로 나눌 수 있다. 일반적으로 도로이용자비용(C_T)은 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용, 불편함의 비용, 환경영향비용 등 5가지 항목으로 크게 평가되어 왔다[Berthelot등, 1996]. 이 중 가장 중요하게 고려되는 항목은 시간지연비용(C_{TDC})과 차량운행비용(C_{VOC})으로서 이 두 비용의 합으로 도로이용자비용을 모델링하였다. 일단 손상이 발생하면 외관조사나 보수, 복구기간 동안 모든 차량이 우회하는 것으로 가정하였다[임종권,1999].

$$C_T = C_{TDC} + C_{VOC} \quad (9)$$

$$C_{TDC} = t_R \sum TN_p u_t \Delta t_d \quad (10)$$

$$C_{VOC} = t_R \sum [\sum T u_f \Delta t_d + \sum T (u_{cd} l_d - u_{co} l_o)] \quad (11)$$

여기서 t_R = 복구기간(일); T = 우회도로에서의 일일평균교통량; N_p = 평균재차인원수; u_t = 1인당 시간 가치(원/시간/인); Δt_d = 증가차량에 의한 지연시간; u_f = 차량의 단위고정비(원/시간/대); u_{co}, u_{cd} = 교통 통제 전/후의 단위유류비용(원/시간/대); l_o, l_d = 원래도로연장과 우회한 도로연장(km)이다.

시간지연비용은 승용차, 택시 그리고 버스에 대한 각각의 업무교통량 및 비업무교통량에 대한 단위 시간가가 다르므로 구분하여 적용하여야 한다. 택시운전자의 시간가치는 차량운행비용의 고정비인 운전자의 인건비에서 고려되므로 운전자에 대한 비용의 중복계산을 피하기 위해 비용산출시 각 차량별 평균재차인원에서 1명씩을 감하여 구하였다. 차량운행비용은 고정비와 변동비의 항목으로 분류하였는데 고정비의 경우는 택시, 버스 그리고 화물차의 각각에 대한 차량 1대 당 고정비용과 각각의 차종별 교통량을 곱하여 구할 수 있으며 주로 운전자의 인건비를 고려하여 각각의 차종에 따른 시간당 고정비용을 통해서 산정하였고 변동비의 경우는 정상도로에서 우회도로를 이용함으로써 발생할 수 있는 추가된 연장이나 차량속도저하로부터 발생할 수 있는 추가 연료비의 항목으로 추정될 수 있으며 차량의 종류 및 주행속도에 따른 단위거리당 연료소모량은 교통개발연구원(손의영, 1992) 연구에서 제시한 방법을 이용하여 연료비를 추산하였다

도로이용자 비용이 결정되면 간접적 지역경제 손실비용은 도로이용자 비용의 함수로 나타낼 수 있다. Seskin(1990)은 이러한 간접적 지역경제편익은 도로이용자편익의 50~150%정도로 산정되어짐을 제시한 바 있다. 따라서 본 논문에서는 간접적 지역경제 손실비용을 구체적으로 모델링하지는 않았지만 적용교통량의 사회적 중요성을 감안하여 도로이용자비용의 150%로 가정하였다.

이에 따라 본 연구에서 간접비용을 산정한 결과 사용성과손과 강도파손의 비용은 바닥판인 경우 초기비용의 448배이고 주형의 경우 초기비용의 191배, 1907배인 것으로 나타났으며 이는 보강기간에 근거한 간접비용이 보강비용의 산정에 있어서 가장 지배적인 인자이며, 이것은 LCC의 평가에서 실제 기대되는 보강 작업시간을 사용하는 것이 적절하다고 사료된다.

4.3 통계적 불확실량

본 연구에서 체계신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 재료강도와 하중변수를 제외하고는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련 데이터의 부족으로 인하여 국내·외의 관련연구[Ellingwood, 1980; Cho, 1989; Hart, 1982]를 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하였다. 저항의 경우 평균공칭비는 1.1, COV는 0.12, 분포형은 Normal분포이며, 사하중의 경우 평균공칭비는 1.05, COV는 0.1, 분포형은 Normal분포이고 활하중의 경우 평균공칭비는 1.24, COV는 0.25, 분포형은 Lognormal 분포로 가정하였다.

4.4 결과 및 분석

표 4. 최적설계 결과

		재래적 설계	초기비용 최적설계	LCC 최적설계 (단일최적화방법)	LCC 최적설계 (협동최적화방법)	
주 형	상부 플랜지 두께 (mm)	그룹1	10.0	10.0	10.0	
		그룹2	10.0	10.0	10.0	
		그룹3	20.0	10.0	10.0	
		그룹4	30.0	20.6	33.1	
		그룹5	20.0	10.0	12.1	
		그룹6	10.0	10.0	10.0	
		그룹7	14.0	10.0	10.0	
		그룹8	18.0	10.0	10.0	
	하부 플랜지 두께 (mm)	그룹1	12.0	10.0	10.0	
		그룹2	16.0	13.2	12.8	
		그룹3	24.0	10.0	10.0	
		그룹4	32.0	22.5	31.5	
		그룹5	22.0	10.0	10.5	
		그룹6	10.0	10.0	10.0	
		그룹7	14.0	10.0	10.0	
		그룹8	20.0	14.0	13.0	
	복부 두께 (mm)	그룹1	10.0	10.0	10.0	
		그룹2	10.0	10.0	10.0	
		그룹3	12.0	10.0	10.0	
		그룹4	12.0	12.1	10.0	
		그룹5	12.0	10.0	10.0	
		그룹6	10.0	10.0	10.0	
		그룹7	12.0	10.0	10.0	
		그룹8	12.0	10.0	10.0	
초기비용(×1,000원)		789,773	665,848	695,280	700,493	
유지관리비용(×1,000원)		78,977	66,585	69,528	70,050	
바 다 판	슬래브두께 (cm)	외측	30	30.5	30.6	
		내측	25	22.6	23.8	
	철근량(cm ²)	외측	22.92	14.33	23.83	
		내측	22.92	18.20	28.03	
	초기비용(×1,000원)		252,837	226,763	260,556	259,402
	유지관리비용(×1,000원)		25,284	22,676	26,056	25,940
총기대파손비용(×1,000원)		48,507	5,831,012	36,529	31,657	
합계	총기대비용(×1,000원)	1,195,378	6,812,884	1,087,949	1,087,542	

강상자형교의 최적 LCC 설계의 효과를 분석한 수치해석 결과와 협동최적화 방법을 이용한 결과를 표 4에 나타내었다. 각 설계방법에 따른 부모멘트 최대부인 단면그룹 4의 상부플랜지 두께에 대해서 LCC 최적설계인 경우 약 33mm인 반면, 초기비용 최적설계에서는 약 21mm 정도로서 LCC 최적설계가 초기비용 최적설계에 비해 약 57% 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이 사실로 미루어 LCC 측면에서 파손확률에 지배적인 영향을 미치는 위험단면에 대해서는 안전측으로 설계되도록 유도하고 있음을 알 수 있다. 바닥판의 최적설계 결과를 살펴보면 초기비용 최적설계인 경우는 바닥판의 두께가 30.5cm(외측), 22.6cm(내측)이고 철근량은 14.33cm²(외측), 18.20cm²(내측)인 반면 LCC 최적설계인 경우는 바닥판의 두께가 30.6cm(외측), 23.8cm(내측)

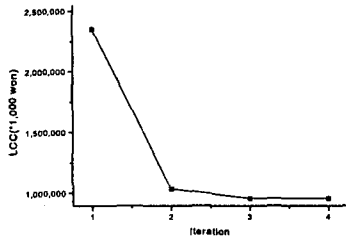


그림 7. 시스템레벨의 목적함수(LCC)의 수렴이력

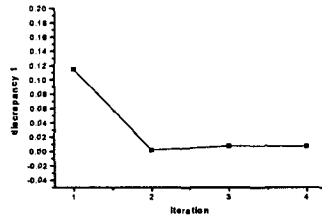


그림 8. 모순함수(1)의 수렴이력

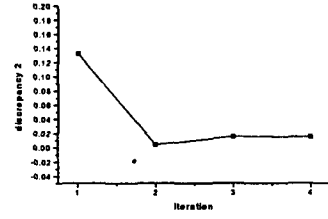


그림 9. 모순함수(2)의 수렴이력

이고 철근량은 23.83cm²(외측), 28.03cm²(내측)이다. LCC 개념을 도입한 바닥판의 설계시 바닥판 두께의 보강은 주형에 대해서 사하중을 증가시켜 주는 효과가 나타나므로 전체구조물의 LCC 측면에서 철근량을 증가시키는 것이 좀 더 경제적인 설계를 유도한다고 볼 수 있다.

그리고 각 설계방법에 따른 바닥판 주형의 초기비용을 비교하면 바닥판의 초기비용은 초기비용 최적설계인 경우 226,763천원, LCC 최적설계인 경우는 260,556천원으로 초기비용 최적설계가 약 13%정도 경제적이고 주형의 경우 초기비용 최적설계는 665,848천원, LCC 최적설계는 695,280천원으로 초기비용 최적설계가 약 4%정도 경제적이다. 하지만 총기대비용을 살펴보면 초기비용 최적설계인 경우는 6,812,884천원, LCC 최적설계인 경우는 1,087,949천원으로 총기대비용면에서 약 6배의 차이가 나므로 LCC 측면에서 LCC 최적설계가 매우 경제적인 설계방법임을 알 수 있다.

또한 강상자형교의 LCC 최적설계에 대한 협동최적화 알고리즘의 적용가능성 여부를 살펴보면 그 결과치(표4)가 기존의 단일최적화 방법을 사용한 결과치와 거의 유사한 값을 나타내고 있으며 그림 7은 각 iteration에 대한 총기대비용의 추이도를 나타낸 것으로 최소치에 일정하게 수렴함을 알 수 있다. 또한 그림 8, 9는 각 iteration에 대한 모순함수의 값을 나타낸 것으로 시스템 레벨의 정식화에 따라 모두 0으로 수렴함을 볼 수 있어 기존의 알고리즘과 비교할 때 정확성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 따라서 앞으로 구조물의 시스템이 더욱 복잡해지고 전문화됨에 따라 LCC의 항목은 계속적으로 확장되는 추세이며 이에 발맞추어 효율적인 최적화를 수행하기 위해서는 기존의 단일최적화 방법의 한계를 극복할 수 있는 알고리즘이라 사료된다. 또한 협동최적화 방법은 현재 컴퓨터의 고도화된 발전을 기반으로 효율적인 자료의 분산처리방법을 가능하게 함으로서 교량의 부재요소를 설계하는 각 분야별로 해석 및 설계를 수행할 수 있게 해주어 LCC 개념과 맞물려 차세대 설계방법이라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서 적용 예를 통하여 협동최적화 방법을 이용한 강상자형교의 최적 LCC 설계에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) LCC 최적설계에 의한 초기비용은 초기비용 최적설계에 의한 초기비용보다 많지만, 최적 LCC 설계는 총기대비용 LCC를 현저하게 감소시켜 효율적이며 경제적인 설계방법이다.
- (2) 협동최적화 방법을 이용한 LCC 최적설계의 결과치는 단일최적화 방법과 비교해 볼 때 정확성 측면에서 신뢰할 수 있는 값이 유도되므로 강상자형교의 LCC 최적설계에 대한 협동최적화 알고리즘은 적용 가능하다.
- (3) 협동최적화 방법은 현재 컴퓨터의 고도화된 발전을 기반으로 효율적인 자료의 분산처리방법을 가능하게

함으로서 교량의 부재요소를 설계하는 각 분야별로 해석 및 설계를 수행할 수 있게 해주어 LCC 개념과 맞물려 차세대 설계방법이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 99' 산·학·연 연구개발사업 과제 '강상자형교 설계종합 시스템 개발'의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ball, R. J., and Sobieszcanski-Sobieski, J. (1996)., "Optimization of Coupled Systems : A Critical Overview of Approaches." AIAA Journal, Vol. 34, No.1, pp. 6-17
2. Bischof, C., Carle, A., Khademi, P., and Mauer, A. (1996). "The ADIFOR2.0 system for the automatic differentiation of FORTRAN 77 programs." IEEE Computational Sci. and Engrg., 3(3), 18-32.
3. Braun, R. and Kroo, I. (1996). "Collaborative Optimization : An Architecture for Large-Scale Distributed Design." Ph.D Thesis, Stanford University.
4. de Brito J. and Branco, F. A. (1994). "Bridge Management Policy using cost analysis." Proc. Instn Civ. Engrs Structs and Bldgs, 104, Nov., 431-439.
5. Frangopol, D. M., and Lin, K. Y. (1997). "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 10.
6. Hart, G. C. (1982). "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering." Prentice-Hall.
7. Koskito, O. J., and Ellingwood, B. R. (1997). "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3.
8. Lin, K. Y. (1995). "Reliability-based minimum Life-Cycle Cost Design of Reinforced Concrete Girder Bridges." PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Colorado, Boulder, Colo.
9. 도로교설계기준(2000). 사단법인 도로교통협회
10. 손의영(1992). "교통혼잡비용 예측 연구", 교통개발연구원, 교통92-17
11. 임종권(1999). "구조수명간 최소기대비용에 기초한 교량의 최적내진안전수준의 결정을 위한 신뢰성해석기법.", 박사학위논문, 한양대학교
12. 조효남, 민대홍, 권우성(2000). "신뢰성지수의 민감도 해석을 이용한 신뢰성에 기초한 최적설계.", 전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집
13. 조효남, 민대홍, 권우성(2001). "강상자형교의 생애주기비용 최적설계.", 전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집
14. 조효남, 민대홍, 조준석(2000). "고속철도 강교량의 Life-Cycle Cost 최적설계.", 전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집
15. 조효남, 정지승(1999). "효율적인 재해석기법에 의한 강상자형교의 최적설계.", 강구조학회 논문집, 11권5호