

강상자형교의 생애주기비용 최적설계 Life-Cycle Cost Optimization for Steel Box Girder Bridges

조효남* 민대홍** 권우성*** 정기영***
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Kwon, Woo-Sung Chung, Ki-Young

ABSTRACT

This paper presents an optimum deck and girder system design for minimizing the life-cycle cost (LCC) of steel box girder bridges. 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 demonstrate the effect of LCC optimum design of steel box girder bridges, the LCC optimum design is compared with conventional design method for steel box girder bridges design. From the numerical investigations, it may be positively stated that the optimum design of steel box girder bridges based on LCC will lead to more rational, economical and safer design.

1. 서 론

근래까지는 일반적인 도로교량에 대한 건설계획을 세울 때에 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용 보다는 설계 및 건설 등의 초기비용에 국한해서 고려하는 경우가 많았다. 가령 강상자형교의 설계는 기술자의 경험에 의해 가정된 구조형식 및 부재치수를 기초로 하여 설계조건과 시방서의 설계허용한계를 만족하는 몇 개의 구조를 설계한 후 그 중에서 비용이 가장 적게 드는 것을 최종설계로 채택하였다. 그러나 강상자형교와 같이 건설비용뿐만 아니라 장기적인 유지관리가 매우 중요한 구조물에 대해 초기비용 이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용에 대한 이해가 날로 커지고 있으며 이러한 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려하고 있는 추세이다. 최근 LCC를 고려한 설계에 관한 국외 연구로 Brito와 Branco(1994)는 교량의 관리해석 시스템 내에서 발생할 수 있는 이익 및 교량의 기능상의 비용을 포함한 총기대 LCC를 제시한 바 있으며, Frangopol(1997)은 시간경과에 따라 열화손상을 입은 교량의 보수·보강계획을 고려한 LCC 최적화에 대한 연구를 수행하였고, Ellingwood(1997)는 신뢰성에 기초한 프리캐스트 콘크리트 구조의 LCC를 최소화하는 설계를 연구한 바 있다. 국내에서는 조효남(2000)의 고속철도 강교량의 LCC 최적설계와 장대 PC교량의 최적내진성능을 위한 최소기대 LCC모델에 관한 연구가 있다.

본 연구에서는 강상자형 교량의 설계에 있어서 바닥판과 주형의 강도와 사용성에 대한 기대파괴비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 비용함수모형을 이용하여 이를 최적설계에 적용하였고 기존의 설계법인 허용응력설계법을 토대로 LCC 측면에서 최적이라고 판단되는 응력수준을 허용응력비율의 적용을 통해 제시하였다.

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수
** 학생회원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
*** 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

2. 최적 LCC 설계문제의 정식화

2.1 설계변수

강상자형교의 구조요소에는 바닥판, 주형, 가로보 등이 있으며 이 중에서 바닥판과 가로보는 국부적인 하중에 지배적이며, 주형은 시스템해석을 통해서 설계되어진다. 이 중에서도 상부구조의 건설공비와 구조적인 거동에 큰 영향을 미치는 요소로 판단되는 바닥판과 주형에 대해서 설계변수를 취하였으며 기타 부재는 설계상수로 정하였다. 바닥판의 설계변수는 캔틸레버부와 중앙지간부의 콘크리트 슬래브의 두께와 철근량으로 선정하였고(그림1) 슬래브의 두께와 철근량은 주형의 최적설계 수행시 사하중의 입력 데이터로 사용된다. 주형의 설계변수는 정·부모멘트 구간에 따라 변단면을 고려하여 각 단면그룹에 대한 상부 플랜지의 두께와 하부 플랜지의 두께, 그리고 웨브의 두께로 정하였다(그림2).

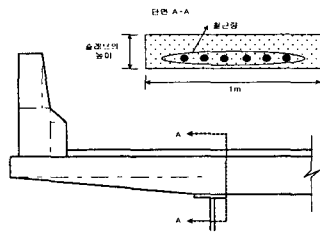


그림 1. 바닥판의 설계변수

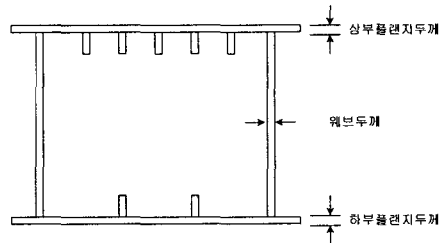


그림 2. 주형의 설계변수

2.2 목적함수

구조물의 설계에 있어 비용해석에 관계된 결과값들이 비용의 가치항으로 표현될 때 기대비용이라 할 수 있으며, 이러한 LCC를 최소화하는 것이 바람직하다[Melchers, 1987]. 따라서, LCC 최적설계를 위해 공용간 총기대비용(Expected Total LCC)을 최소화하기 위한 비용함수는 이러한 모든 사항을 고려하여야 하나 본 연구에서는 안전에 가장 지배적인 강도파괴에 대한 보강기대비용, 사용성에 대한 보강기대비용, 유지관리비용 그리고 초기비용에 국한하여 바닥판과 주형에 대하여 식(1), (2)와 같은 목적함수로 정식화하였다.

$$C_{CT} = C_{C0} + C_{CM} + P_{Cfu}C_{Cfu} + P_{Cfs}C_{Cfs} \quad (1)$$

$$C_{ST} = C_{S0} + C_{SM} + P_{Sfu}C_{Sfu} + P_{Sfs}C_{Sfs} \quad (2)$$

여기서,

C_{CT} = 바닥판의 총기대비용(LCC); C_{C0} = 바닥판의 초기비용; C_{CM} = 바닥판의 유지관리비용; C_{Cfu} , C_{Cfs} = 바닥판의 강도 보강비용, 사용성 보강비용; P_{Cfu} , P_{Cfs} = 바닥판의 강도 파괴확률, 사용성 파괴확률; C_{ST} = 주형의 총기대비용(LCC); C_{S0} = 주형의 초기비용; C_{SM} = 주형의 유지관리비용; C_{Sfu} , C_{Sfs} = 주형의 강도 보강비용, 사용성 보강비용; P_{Sfu} , P_{Sfs} = 주형의 강도 파괴확률, 사용성 파괴확률.

초기비용은 건설비용과 설계비용, 그리고 하중재하시험비용을 고려하였는데, 설계와 하중재하시험비용은 전문가의 경험에 의한 시공비용의 비율로 결정하였다(de Brito and Branco, 1995). 교량의 유지관리비용은 국내의 교량의 건설계획 시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상 교량에 적합한 사례 등을 참조하여 산출하면 되지만 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(1995)에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다. 보강

기대비용 (C_{fu}, C_{fs})은 파괴확률(P_{fu}, P_{fs})과 한계상태에 따른 인명과 장비의 손실 비용, 보수·보강 기간동안 교량의 기능상의 장애로 인하여 발생할 수 있는 도로이용자 비용, 환경적 영향과 사회적 비용을 고려하였다(de Brito and Branco, 1995, 1997; Seskin, 1990; Rosenblueth, 1986; Cho et al, 1999). 본 연구에서는 교량이 붕괴에 이르기 전에 보수·보강작업을 수행하는 것으로 가정하였으므로 인명과 장비의 손실 비용은 고려하지 않았다.

2.3 제약조건

강상자형교의 최적설계에 사용되는 제약조건은 실무에서 주로 사용하는 허용응력설계법(ASD)에 의한 제약조건으로 표 1과 같이 정식화하였고 각각의 변단면마다 아래의 제약조건을 고려하였다.

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 $G_1 = f_{cu} / f_{ca} - 1 \leq 0$ $G_2 = f_{su} / f_{sua} - 1 \leq 0$ $G_3 = f_{sl} / f_{sla} - 1 \leq 0$	f_{cu} :콘크리트 바닥판 상단의 휨응력 f_{ca} :콘크리트 바닥판 상단의 허용휨응력 f_{su}, f_{sl} :주형 상·하단의 휨응력 f_{sua}, 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)

3. 한계상태모형 및 신뢰성 해석

3.1 한계상태 모형

LCC 함수에 정의된 구조물의 파괴확률을 고려하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 주형의 강도파괴인 경우 휨모멘트에 의한 플랜지의 파괴와 전단력에 의한 웨브의 파괴로 정의하고 식(3), (4)에 나타내었으며 주형의 활하중 처짐에 대한 사용성 한계상태모형은 식(5)에 나타내었다. 그리고 바닥판인 경우 휨모

멘트에 의한 슬래브의 강도파괴와 균열에 대한 사용성 한계상태모형을 각각 식(6), (7)에 정의하였다.

$$g(\cdot) = f_{MR} - (f_{MD} + f_{ML}) \quad (3)$$

$$g(\cdot) = v_{SR} - (v_{SD} + v_{SL}) \quad (4)$$

$$g(\cdot) = \delta_{all} - \delta_i \quad (5)$$

$$g(\cdot) = M_{MR} - (M_{MD} + M_{ML}) \quad (6)$$

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

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_{MR}, M_{CR} = 콘크리트 바닥판의 실공칭 모멘트/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 파괴확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다. 그림 3은 본 연구에서 적용된 4경간 연속보의 파괴 메카니즘과 직·병렬시스템 모델을 보여주고 있다.

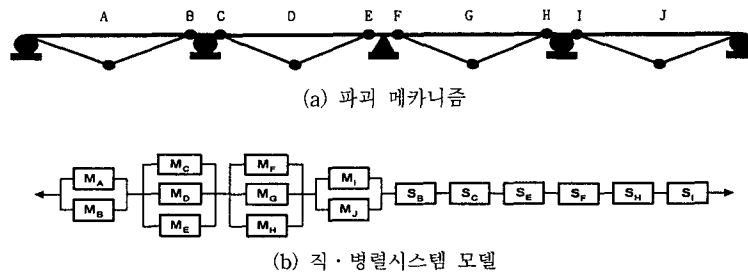


그림 3. 체계 신뢰성 해석모델

4. 강상자형교의 LCC 최적설계 알고리즘

본 논문에서는 강상자형교의 최적설계를 위하여 바닥판과 주형에 대하여 각각 최적설계를 수행하였으며, 최적설계 알고리즘은 그림 4와 같다. 주형 및 바닥판의 최적설계에 사용된 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM (Augmented Lagrange Multiplier) 방법과 BFGS(Broydon -Fletcher-Goldforb-Shanno) 방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis)를 이용하

여 수행하였고 구조해석은 유한요소법을 사용하였다. LCC 최적설계 알고리즘에는 구조해석의 효율성을 위해 활하중에 대한 처짐은 설계변수의 민감도 분석을 이용한 구조재해석을 위해 자동미분기법(Automatic Differentiation)을 사용하였고 이를 근사화시키는 방법으로 본 논문에서는 국부근사화 방법들 중 선형근사화 방법을 사용했다. 구조물의 최대 처짐을 d 라고 하고 X 가 설계변수의 벡터라면, d 는 다음의 식 (8)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$d(X) \approx d(X_0) + \nabla d(X_0)\delta X \quad (8)$$

여기서, $\delta X = X - X_0$; X_0 는 Taylor전개에서 설계변수의 시점이다. 그리고 ∇ 는 함수의 기울기를 나타낸다. 또한 사하중 및 활하중에 의한 응력은 기존 연구(조효남, 1999)에서 제안된 응력재해석 기법을 사용하였다.

5. 적용에 및 고찰

5.1 대상구조물의 일반사항

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

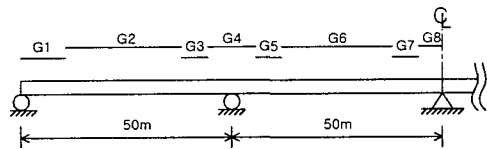


그림 5. 종방향 단면그림

5.2 생애주기비용의 계산

5.2.1 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.

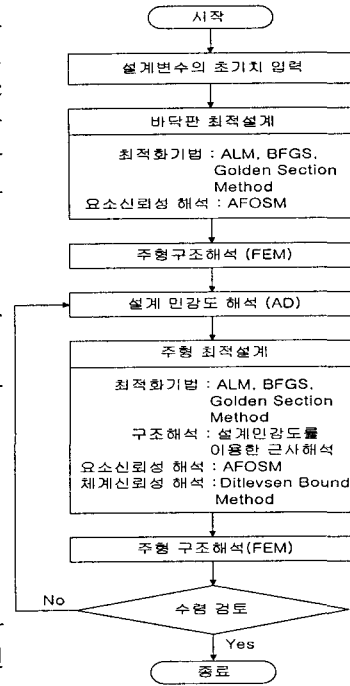


그림 4. 강상자형교의 LCC 최적설계 알고리즘

표 2. 대상구조물의 사용재료

강재 (주부재)	사용강재	SM490
	항복응력(kg/cm ²)	3,200
	허용인장응력(kg/cm ²)	1,900
	허용전단응력(kg/cm ²)	1,100
콘크리트	탄성계수(kg/cm ²)	2.0×10 ⁶
	설계기준강도(kg/cm ²)	270

$$C_0 = C_{0D} + C_{0C} + C_{0T} \quad (9)$$

여기서,

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

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

5.2.2 보강기대비용의 정식화

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

표 3. 보강기대비용 계산을 위한 보강방법 및 공사기간

파괴종류	바닥판		주형	
	강도파괴	사용성(균열)파괴	강도파괴	사용성(처짐)파괴
적용공법	부분교체	에폭시주입	부분교체	프리스트레싱
공사기간	1달	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.

$$C_T = C_{TDC} + C_{VOC} \quad (10)$$

$$C_{TDC} = t_R \sum TN_p u_i \Delta t_d \quad (11)$$

$$C_{VOC} = t_R \sum [\sum T u_f \Delta t_d + \sum T (u_{cd} l_d - u_{co} l_o)] \quad (12)$$

여기서 t_R = 복구기간(일); T = 우회도로에서의 일일평균교통량; N_p = 평균재차인원수; u_i = 1인당 시간가치(원/시간/인); Δt_d = 증가차량에 의한 지연시간; u_f = 차량의 단위고정비(원/시간/대); u_{co}, u_{cd} = 교통통제 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 시간가치가 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 적용교량의 사회적 중요성을 감안하여 도로이용자비용의 150%로 가정하였다.

이에 따라 본 연구에서 간접비용을 산정한 결과 사용성과파괴와 강도파괴의 비용은 바닥판인 경우 초기비용의 448배, 962배이고 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.

5.3 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.

5.4 결과 및 분석

강상자형교의 최적 LCC 설계의 효과를 분석한 수치해석 결과를 표 4에 나타내었다. 또한 LCC 설계를 얻기 위해서는 실제 재래적 설계에서 사용되는 응력한계와 같은 적정 허용응력비 또는 저항감소계수비가 사용될 수 있으므로, 허용응력변화(허용응력의 70%~105%)와 저항감소계수비의 변화(저항계수의 30%~100%)에 따른 초기비용 최적설계를 수행하였으며, 각각에 대한 총기대 LCC를 그림 6, 7에 나타내었다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 본 적용 예와 같은 구조물에서는 주형의 경우 허용응력 적용비율 90%, 바닥판의 경우 저항감소계수비율 45%를 적용한 초기비용 최적설계가 근사적인 최적의 LCC 설계로 이루어짐을 알 수 있고 이에 대한 최적설계 결과는 또한 표 4에 나타내었다. 각 설계방법에 따른 부모멘트 최대부인 단면그룹 4의 상부플랜지 두께에 대해서 LCC 최적설계와 허용응력의 90%를 적용한 초기비용 최적설계에서 각각 32mm, 27mm인 반면, 초기비용 최적설계에서는 23mm이다. 즉 LCC 최적설계와 허용응력비율 90%를 적용한 초기비용 최적설계의 상부플랜지의 두께는 초기비용 최적설계보다 약 45%, 17% 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이 사실로 미루어 LCC 측면에서도 파괴확률에 지배적인 영향을 미치는 위험단면에 대해서는 안전측으로 설계되도록 유도하고 있음을 알 수 있다. 바닥판의 최적설계 결과를 살펴보면 초기비용 최적설계인 경우는 바닥판의 두께가 30cm(외측), 21cm(내측)이고 철근량은 14.09cm²(외측), 19.64cm²(내측)인 반면 LCC 최적설계인 경우는 바닥판의 두께가 38cm(외측), 22cm(내측)이고 철근량은 16.36cm²(외측), 19.34cm²(내측)이다. LCC 개념을 도입한 바닥판의 설계시 외측부 바닥판 두께의 보강이 구조물의 안전성을 확보하며 LCC 측면에서 보다 경제적인 설계로 유도한다고 볼 수 있다.

표 4. 최적설계 결과

		재래적 설계	초기비용 최적설계	LCC 최적설계	허용응력비율(90%) /저항감소계수비율 (45%)를 적용한 초기비용 최적설계	
주 형	상부 플랜지 두께 (mm)	그룹1	10	10	10	10
		그룹2	10	10	10	10
		그룹3	20	10	10	10
		그룹4	30	23	32	27
		그룹5	20	10	10	10
		그룹6	10	10	10	10
		그룹7	14	10	10	10
		그룹8	18	10	10	10
	하부 플랜지 두께 (mm)	그룹1	12	10	10	10
		그룹2	16	12	13	14
		그룹3	24	10	10	13
		그룹4	32	24	31	29
		그룹5	22	10	11	13
		그룹6	10	10	10	10
		그룹7	14	10	10	10
		그룹8	20	13	15	13
	복부 두께 (mm)	그룹1	10	10	10	10
		그룹2	10	10	10	10
		그룹3	12	10	10	10
		그룹4	12	11	10	11
		그룹5	12	10	10	10
		그룹6	10	10	10	10
		그룹7	12	10	10	10
		그룹8	12	12	10	12
초기비용(×1,000원)		734,952	622,010	642,643	659,998	
유지관리비용(×1,000원)		73,495	62,201	64,264	66,000	
강도기대파괴비용(×1,000원)		10,117	220,039	15,833	27,844	
사용성기대파괴비용(×1,000원)		2,698	35,236	3,202	216	
총기대비용(×1,000원)		821,262	939,486	725,942	754,058	
바 닥 판	슬래브두께 (cm)	외측	30	30	38	34
		내측	25	21	22	30
	철근량(cm ²)	외측	22.92	14.09	16.36	28
		내측	22.92	19.64	19.34	30
	초기비용(×1,000원)		229,852	205,574	223,280	264,299
	유지관리비용(×1,000원)		22,985	20,557	22,328	26,430
	강도기대파괴비용(×1,000원)		506	695,555	1,096	1.7
	사용성기대파괴비용(×1,000원)		293,949	1,806,756	2,003	2,293
	총기대비용(×1,000원)		547,292	2,728,442	248,707	293,024
	합계	총기대비용(×1,000원)	1,368,554	3,668,928	974,649	1,047,082

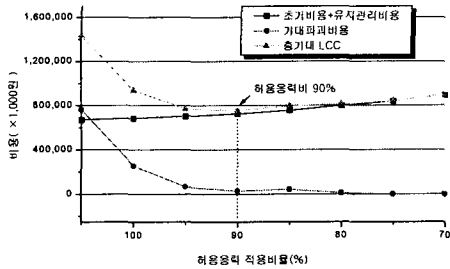


그림 6. 허용응력 변화에 따른 주형의 총기대 LCC

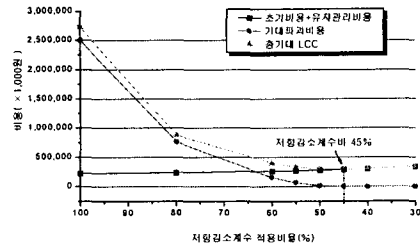


그림 7. 저항감소계수 변화에 따른 바닥판의 총기대 LCC

그리고 각 설계방법에 따른 바닥판의 초기비용과 총기대 LCC를 비교하면 초기비용최적설계에 대한 최적 초기비용은 205,574천원인 반면, LCC 최적설계인 경우는 223,280천원, 저항감소계수를 적용한 설계인 경우는 264,299천원, 재래적인 설계인 경우 229,852천원이다. 이는 초기비용최적설계의 초기비용은 LCC 최적설계와 비교할 때 약 8.6%정도 경제적이지만 총기대비용으로 비교한다면 초기비용 최적설계는 2,728,442천원, LCC 최적설계는 248,707천원으로 총기대비용면에서 약 11배의 차이가 나므로 LCC 측면에서 LCC 최적설계가 매우 경제적인 설계법임을 알 수 있다. 그리고 저항감소계수를 적용한 초기비용 최적설계인 경우 총기대비용이 293,024천원으로서 LCC 최적설계시 총기대비용과 약 15~18% 차이를 보여 근접함을 알 수 있다. 따라서 복잡한 LCC 최적설계를 직접 사용하는 것보다 실용적인 측면에서는 본 연구에서 제안하는 근사적인 방법을 사용해도 간접적인 LCC 효과를 고려한 설계를 유도할 수 있다고 보여진다.

또한 주형의 초기비용과 총기대 LCC를 비교하면 각각의 최적설계방법에 대한 최적초기비용은 622,010천원에서 734,952천원으로 작은 폭의 변동성을 보이는 반면 총기대비용 측면에서 볼 때는 LCC 최적설계방법이 725,942천원, 초기비용 최적설계인 경우 939,486천원으로 총기대비용면에서 LCC 최적설계방법이 초기비용 최적설계방법에 비해 약 20~25%정도 경제적이다. 또한 허용응력비율을 적용한 초기비용 최적설계의 경우 총기대비용 측면에서 LCC 최적설계와 약 4%의 근소한 차이를 보여 LCC의 간접적인 효과를 고려해 준다는 점에서 재래적인 설계방법 보다는 LCC 측면에서 경제적인 설계임을 알 수 있다.

앞서 추론했던 결과를 토대로 바닥판과 주형을 고려한 전체 상부구조계에서의 여러 설계방법들 중 총기대비용 측면에서 볼 때 초기비용 최적설계인 경우 3,668,928천원, 재래적 설계인 경우 1,368,554천원, 허용응력과 저항감소계수비율을 적용한 초기비용 최적설계인 경우 1,047,082천원, LCC 최적설계인 경우는 974,649천원으로 여타의 설계방법보다 LCC 최적설계방법이 가장 경제적이고 유효한 설계법이다. 그리고 허용응력비율과 저항감소계수비율을 적용한 초기비용 최적설계는 암시적으로 LCC의 효과를 발휘하고 있어 실용적인 설계법으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서 적용 예를 통하여 강상자형교의 최적 LCC 설계에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.
 (1) LCC 최적설계에 의한 초기비용은 초기비용 최적설계에 의한 초기비용보다 많지만, 최적 LCC 설계는 총