

강상판교의 생애주기비용 최적설계

Optimum Life-Cycle Cost Design of Orthotropic Steel Deck Bridges

조 효 남¹⁾ · 민 대 홍²⁾ · 이 광 민³⁾

Cho, Hyo Nam Min, Dae Hong Lee, Kwang Min

요 약 : 교량은 계속적으로 변하는 하중 환경에 의해서 다른 구조물에 비해 비교적 빨리 노후화 되기 때문에 초기비용 이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용의 영향이 크므로 공용간 생애주기비용(LCC)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려되어야 한다. 이에 본 연구에서는 강상판교의 설계에 있어서 주형의 휨·전단, 사용성, 피로에 대한 보강기대비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 비용함수모형을 이용하여 이를 최적설계에 적용하고 기존의 설계방법과 비교·분석하였다. 적용예제의 결과에 나타난 바와 같이 LCC를 고려한 강상판 교량의 최적설계는 더욱 합리적이고, 경제적이며, 안전한 설계를 유도할 수 있으리라 판단된다.

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

핵심용어 : 생애주기비용, 최적설계, 강상판 교량

KEYWORDS : life-cycle cost, optimum design, orthotropic steel deck bridges

1) 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수
2) 학생회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정
3) 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

근래까지는 신설교량에 대한 건설계획을 세울 때에 일반적으로 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용보다는 설계 및 건설 등의 초기비용에 국한해서 고려하는 경우가 많았다. 그러나 최근에는 초기비용 이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용에 대한 중요성이 증대되고 있으며 이러한 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)을 설계단계에서 부터 체계적이고 합리적으로 고려하려는 추세이다. 최근 LCC를 고려한 설계에 관한 국외 연구로 Brito와 Branco⁽⁷⁾가 교량의 관리해석 시스템 내에서 발생할 수 있는 이익 및 교량의 기능상의 비용을 포함한 총기대 LCC를 제시한 바 있으며, Frangopol⁽¹¹⁾이 시간 경과에 따라 열화손상을 입은 교량의 보수·보강 계획을 고려한 LCC최적화에 대한 연구를 수행하였고, Ellingwood⁽¹⁵⁾는 신뢰성에 기초한 프리캐스트 콘크리트 구조의 LCC를 최소화하는 설계를 연구한 바 있다. 국내에서는 조효남^{(27),(29)}에 의해 강상형교, 도로판형교 및 고속철도교량의 LCC 최적설계 및 장대 PC교량의 최적내진성능을 위한 최소기대 LCC모델에 관한 연구가 있다.

본 연구에서는 강상판 교량의 설계에 있어서 주형의 휨·전단, 사용성, 피로에 대한 기대파괴비용 등을 포함하는 LCC에 근거한 비용함수모형을 정식화하여 제안하였으며 이를 최적설계에 적용하고 기존의 설계방법과 비교·분석하였다.

본 연구의 대상교량인 강상판 교량은 수 천개의 부재와 요소가 연결된 복잡한 구조물이기 때문에 설계가 난해하다는 단점을 가지고 있어 구조특성에 적합한 효율적인 최적화를 위해 참고문헌(25)에서 제안된 강상판교 최적설계를 위한 단단계 최적설계 알고리즘에 기대 피로파괴비용을 산정하기 위한 피로신뢰성 모듈을 추가하여 LCC최적화를 수행하였다.

2. 강상판교 LCC최적설계 문제의 정식화

2.1 설계 변수

강상판교의 설계변수는 강상판교의 형고와 주형의 폭 등을 포함하는 전 구조요소의 크기를 사용할 수 있으며 설계자의 판단에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 강상형교의 건설공비와 구조적인 거동에 큰 영향을 미치는 요소로 판단되는 주형의 복부판의 높이 (h), 복부판의 두께 (t_w), 하부 플랜지의 두께 (t_f)와 강바

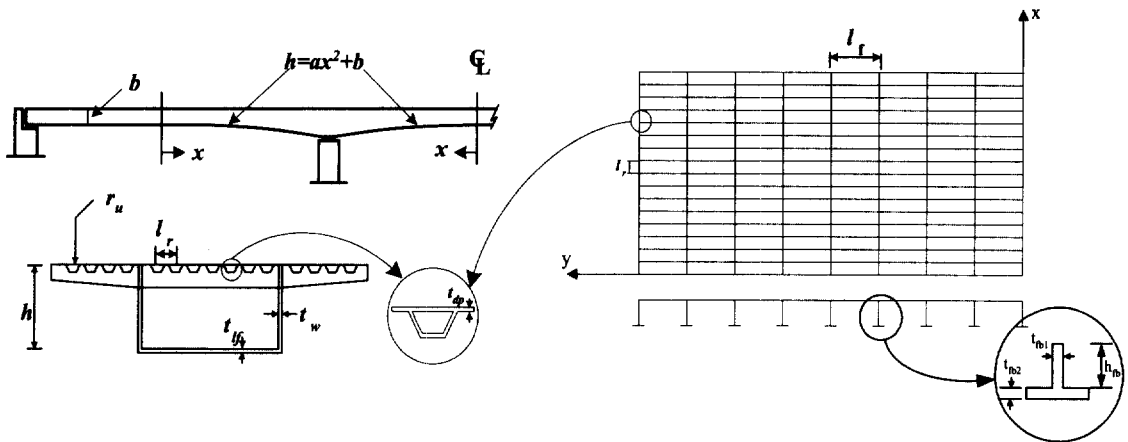


그림 1. 강상판 교량의 LCC최적설계를 위한 설계 변수

다판의 설계 변수인 바닥판의 두께 (t_{dp}), U 리브의 타입 (r_w), 가로보의 치수 (h_{fb}, t_{fb1}, t_{fb2})를 설계변수로 하였으며, 최적의 부재배치를 결정하기 위해 U 리브와 가로보의 간격 (l_r, l_f)도 설계변수로 하였다. 강바닥판 설계변수들은 전 시간에 걸쳐 같은 설계 단면을 가지므로 많은 설계변수를 갖지 않지만 주형은 교량의 전 시간에 걸쳐 각기 다른 설계단면을 가지므로 많은 설계 변수를 갖는다. 최적화 문제를 단순화하기 위해 주형의 설계변수를 줄이는 것이 유리하다. 주형의 설계변수를 줄이기 위해 두 가지 방법이 사용되었는데 하나는 설계변수 연결기법이고 다른 하나는 실용적으로 주형의 형상을 최적화 할 수 있는 포물선 정식화이다. 이는 각 단면마다 다른 높이를 하나의 식으로 나타내어 설계변수를 효과적으로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 시공성도 보장되는 매우 효율적인 방법이다. 강상판교의 높이를 그림 1과 같이 포물선 ($h = ax^2 + b$)으로 표현하였는데 이것은 일반적인 설계에서 주로 사용되는 방식이다.

2.2 비용 함수

구조물의 설계에 있어 비용해석에 관계된 결과 값들이 비용의 가치향으로 표현될 때 기대비용이라 할 수 있으며, 이러한 LCC를 최소화하는 것이 바람직하다⁽¹⁷⁾. 따라서, LCC 최적설계를 위해 공용간 총 기대 LCC를 최소화하기 위한 비용 함수는 이러한 모든 사항을 고려하여야 하나 본 연구에서는 안전에 가장 지배적인 극한강도에 대한 보강기대비용, 처짐의 사용성에 대한 보강기대비용, 강 바닥판의 피로보강기대비용, 유지관리비용 그리고 초기비용에 국한하여 식 (1)과 같은 비용함수로 정식화하였다.

$$C_T = C_0 + C_M + P_{fu}C_{fu} + P_{fs}C_{fs} + P_{ff}C_{ff} \quad (1)$$

여기서, C_T = 총기대 비용; C_0 = 초기비용;

C_M = 유지관리비용; C_{fu}, C_{fs}, C_{ff} = 강도, 사용성, 피로에 대한 보강기대비용; P_{fu}, P_{fs}, P_{ff} = 강도, 사용성, 피로에 대한 보강확률

초기 비용은 설계비용과 시공비용, 그리고 하중재하시험비용을 고려하였는데, 설계와 하중재하시험비용은 전문가의 경험에 의한 시공비용의 비율로 결정하였다⁽⁷⁾. 교량의 유지관리비용은 국내의 교량의 건설계획 시 검토한 경제성분석 보고서 자료와 적용대상교량에 적합한 사례 등을 참조하여 산출하면 되지만 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(1995)에 따라 초기비용의 10%로 정식화하였다. 보강기대비용 (C_{fu}, C_{fs}, C_{ff})은 보강확률 (P_{fu}, P_{fs}, P_{ff})과 교량의 붕괴로 인해 발생할 수 있는 인명과 장비의 손실 비용, 보수·보강 기간동안 교량의 기능상의 장애로 인하여 발생할 수 있는 도로 이용자 비용, 환경적 영향과 사회적 비용을 고려해야 하지만^{(8), (20), (27)} 본 연구에서는 교량이 붕괴에 이르기 전에 보수·보강을 수행하는 것으로 가정하였으므로 인명과 장비의 손실 비용은 고려하지 않았다.

2.3 제약조건

2.3.1 주형의 제약 조건

주형의 최적화를 위해 거동제약조건과 한계제약조건을 도로교설계기준(2000)에 기초하여 표 1과 같이 정리하였다.

2.3.2 강바닥판의 제약조건

강상판의 제약조건은 국부적인 구조거동을 중심으로 거동제약조건과 한계제약조건을 도로교설계기준(2000)에 기초하여 정식화하였다. 강상판의 설계제약조건은 표 2와 같이 정리하였다.

3. 한계상태모형 및 신뢰성 해석

LCC 함수에 정의된 구조물의 파괴확률을 고려

표 1. 주형의 제약조건

	제약조건	기호설명
휨응력	$g_1 = \frac{f_s}{f_{sa}} - 1.0 \leq 0$	f_s = 강재의 휨응력; f_{sa} = 강재의 허용휨응력
전단응력	$g_2 = \frac{\tau_s}{\tau_{sa}} - 1.0 \leq 0$	τ_s = 강재의 전단응력; τ_{sa} = 강재의 허용전단응력
조합응력	$g_3 = \left(\frac{f}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 - 1.2 \leq 0$	f_s = 강재의 휨응력; f_{sa} = 강재의 허용휨응력 τ_s = 강재의 전단응력; τ_{sa} = 강재의 허용전단응력
국부좌굴	$g_4 = \frac{f_s}{f_{bld}} - 1.0 \leq 0$	f_{bld} = 허용국부좌굴응력
피로응력	$g_5 = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{fa}} - 1.0 \leq 0$	f_{\max}, f_{\min} = 활하중에 의한 최대, 최소응력 f_{fa} = 허용피로응력
처짐	$g_6 = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_a} - 1.0 \leq 0$	Δ_{\max} = 활하중에 의한 최대처짐 Δ_a = 허용처짐(L/500)
강재의 최소두께 규정	$g_7 = \frac{b_w}{220} - t_w \leq 0$	b_w, t_w = 복부폭과 두께
	$g_8 = \frac{b_f}{48fn} - t_{cf} \leq 0$	b_f = 플랜지폭
	$g_9 = \frac{b_f}{80n} - t_{tf} \leq 0$	t_{cf}, t_{tf} = 인장, 압축플랜지 두께
강재의 최대두께 규정	$g_{10} = \frac{t}{t_{\max}} - 1.0 \leq 0$	t = 부재 두께 t_{\max} = 부재 최대두께

표 2. 강 바닥판의 제약조건

	제약조건	기호설명
U-리브 휨응력	$g_{11} = \frac{f_d}{f_{all}} + \frac{f_m}{f_{all}} - 1.0 \leq 0$	f = 강상판 해석시 U-리브 응력 f_m = 주형 해석시 U-리브 응력 f_{all} = 강재의 허용응력
가로보 휨응력	$g_{12} = \frac{f_{cross}}{f_{cal}} - 1.0 \leq 0$	f_{cross} = 가로보 휨응력 f_{cal} = 국부좌굴을 고려한 가로보 허용응력
피로응력	$g_{13} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{fa}} - 1.0 \leq 0$	f_{\max}, f_{\min} = 최대응력과 최소응력 f_{fa} = 허용피로응력
바닥판 가로보의 휨응력	$g_{14} = \frac{f_{cross}}{f_{bld}} - 1.0 \leq 0$	f_{cross} = 가로보 휨응력 f_{bld} = 국부좌굴을 고려한 가로보 허용응력
최소두께	$g_{15} = \frac{t_{mfb}}{t_{fb}} - 1.0 \leq 0$	t_{mfb}, t_{mdp} = 가로보와 바닥판의 최소두께
	$g_{16} = \frac{t_{mdp}}{t_{dp}} - 1.0 \leq 0$	t_{fb}, t_{dp} = 가로보와 바닥판의 두께

하기 위하여 각 구조요소의 극한 한계상태모형을 휨모멘트에 의한 플랜지의 파괴와 전단력에 의한 웨브의 파괴로 정의하였다. 전체구조시스템 파괴 확률을 구하기 위하여 각각의 요소파괴확률을 직·병렬시스템으로 정의하고, 구조물의 일부 또는 전체가 구조적 파손을 일으키는 극한강도 한계상태모형을 제안하였다. 휨모멘트 및 전단을 고려한 파괴모드에 대한 한계상태함수를 식(2), (3)과 같이 선형한계상태함수로 정의하였다. 사용성에 대한 한계 상태 모형은 차량의 활하중에 대한 주형의 수직처짐으로 식(4)와 같이 정의하였다. 식(5)와 같은 피로 한계상태는 강 바닥판의 피로 하중의 재하 반복회수에서 결정된다.

$$g(\cdot) = f_R - (f_D + f_L) \quad (2)$$

$$g(\cdot) = \tau_R - (\tau_D + \tau_L) \quad (3)$$

$$g(\cdot) = \delta_a - \delta_L \quad (4)$$

$$g(\cdot) = R - Q \quad (5)$$

여기서, f_R, τ_R = 공칭 극한 휨, 전단 능력;
 f_D, f_L = 사하중과 설계 활하중에 의한 휨능력;
 τ_D, τ_L = 사하중과 설계 활하중에 의한 전단능력;
 δ_a = 허용처짐(L/500); δ_L = 설계 활하중에 처짐;
 R = 등가의 능력 범위에서의 하중반복 회수;
 Q = 하중반복 회수

본 연구에서는 제안한 한계상태함수의 요소신뢰성 해석을 위하여, 랜덤변수의 추정, 평균과 분산 또는 공분산에 의해 표준화된 공간에서 파괴면

경계역까지의 최소거리인 신뢰성지수 β 를 구하는 개선된 1계2차 모멘트법(AFOSM)을 사용하였다. 또한 요소신뢰성 해석결과를 이용해 교량의 주요요소의 파괴모드로 구성된 직·병렬시스템 해석시, 대상 교량의 파괴확률을 산정하기 위하여 Ditlevsen 구간해법을 적용하였다. 그림 2는 본 연구에서 적용된 2경간 연속보 경우의 파괴메카니즘과 직·병렬시스템 모델을 보여주고 있다. 강 바닥판의 피로 파괴는 그림 3에 나타난 바와 같이 폐단면 리브의 연결 용접부의 파괴로 정의하였다. 상판에 폐단면 리브와 가로보를 연결하는 부분은 도로교표준시방서(1996)에서 피로용접상에 따라 제시하고 있는 용력범주 C를 적용하였고, 폐단면 리브와 강바닥판을 연결하는 부분은 용력범주 B를 적용하였다. 피로신뢰성을 평가하기 위해서 식(6)과 같은 Pedro Albrecht 실용식⁽¹⁾을 사용하였다.

$$\beta = \frac{\log N - \log N_d}{\sqrt{(S_R)^2 + m(S_Q')^2}} \quad (6)$$

여기서, β = 신뢰성지수, N, N_d = 등가 능력 범위와 하중 재하 반복회수, S_R, S_Q' = 저항과 하중에 대한 하중 재하 반복회수의 표준편차, m = S-N 선도의 기울기이다. 설계 피로수명은 도로교표준시방서(1996)에 규정된 75년으로 가정하였다.

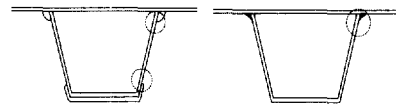


그림 3. 폐단면 리브의 연결부 용접

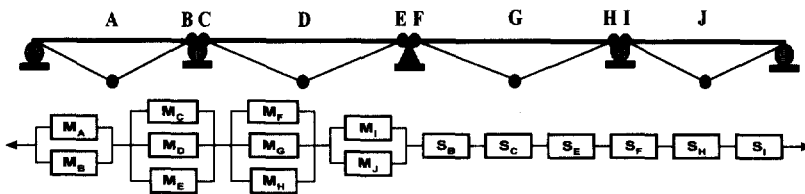


그림 2. 강상판 교량의 파괴 메카니즘

4. 강상판교의 LCC최적설계 알고리즘

본 연구에서는 참고문헌(25)에서 제안된 강상판교의 최적설계를 위한 다단계 최적설계 알고리즘에 피로 보강기대비용을 산정하기 위해 피로신뢰성 모듈을 추가하여 LCC최적화를 수행하였다. 다단계 최적설계 알고리즘에는 강상판교의 효율적인 최적설계를 위해 다단계 최적화 기법인 등위법(coordination method)이 사용되었다. 등위법은 주형과 바닥판을 각각 최적설계 하지만 주형을 최적화 할 때는 바닥판의 근사 최적점에서의 구조거동을 고려하고 마찬가지로 바닥판을 최적화 할 때는 주형의 근사 최적점에 대한 영향을 고려한다. 주형의 최적설계에 사용된 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM (Augmented Lagrange Multiplier)방법과 BFGS (Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno) 방법을 사용하였

다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하여 수행하였고 구조해석은 유한요소법을 사용하였다. 다단계 최적설계 알고리즘에는 구조해석의 효율성을 위해 사하중에 대한 단면력과 활하중에 대한 처짐은 설계변수의 민감도 분석을 이용한 구조재해석을 위해 참고문헌(25)에서 제안한 초등연산(가·감·승·제)과 초동함수(sine, consine, log 등)를 이용하여 순차적으로 연쇄법칙을 적용하여 설계변수에 대해 미분을 수행하는 자동미분기법(Automatic Differentiation)을 사용하였으며 이를 위해 Bichof⁽⁴⁾가 Fortran 버전으로 개발한 ADIFOR를 사용하였다. 활하중에 의한 응력은 참고문헌(28)에서 제안된 응력재해석 기법을 사용하였다. 강 바닥판의 최적설계에

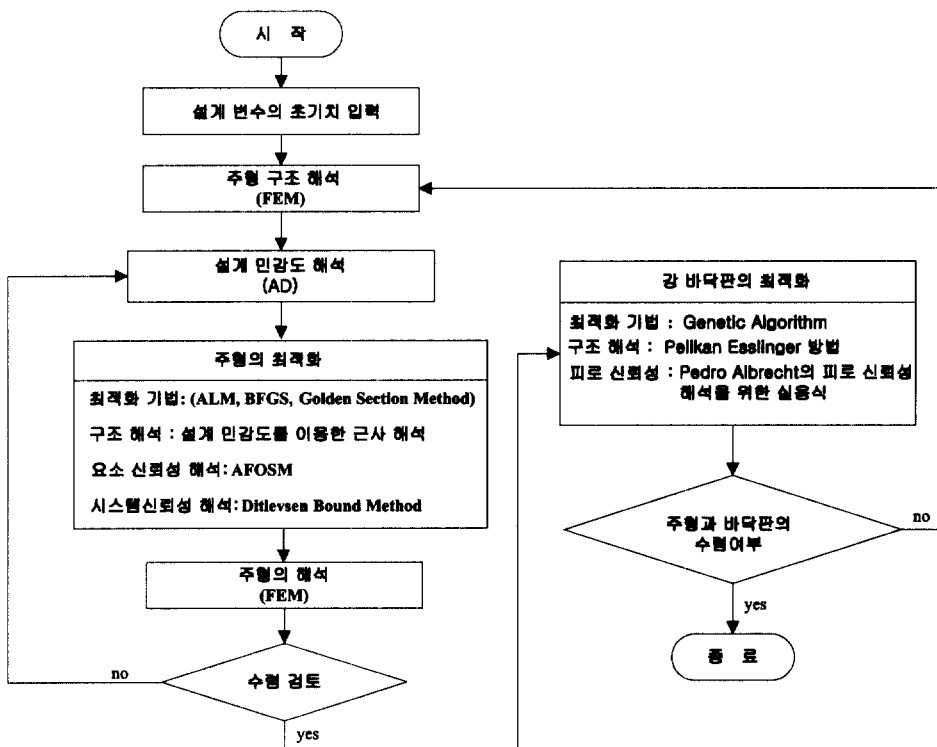


그림 4. 강상판교량의 LCC최적화를 위한 다단계 최적설계 알고리즘

사용된 최적화 방법은 유전자 알고리즘을 사용하였는데, 유전자 알고리즘에 의한 최적화를 위해 Carrol⁽⁸⁾이 Fortran 버전으로 개발한 Genetic Algorithm Driver를 사용하였으며, 일정 교배, 일정 변이, 토너먼트 선택 방법이 사용되었다. 강바닥판의 구조해석은 Pelikan- Esslinger 방법을 사용하였다. 이상과 같은 강상판교의 LCC최적화를 위한 다단계 최적설계 알고리즘에 피로신뢰성 모듈을 추가한 강상판교의 최적화 흐름도는 그림 4에 나타내었다.

5. 적용 예제

본 논문의 LCC최적화를 위한 적용 예로 총 길이 400m(80m+120m+120m+ 80m, 4경간)를 가지는 강상판 교량에 적용하였다. 교량의 종단면 설계그룹과 횡단면은 그림 5와 그림 6에 나타냈다.

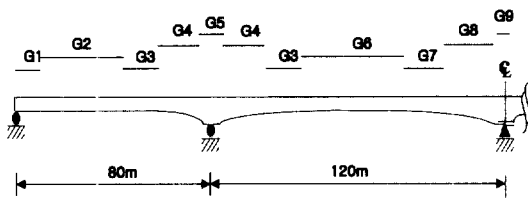


그림 5. 종단면 설계 그룹

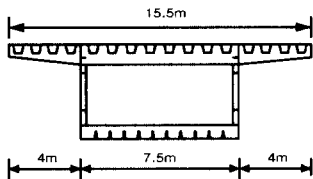


그림 6. 횡 단면

5.1 생애주기 비용의 계산

5.1.1 초기비용과 유지관리 비용

초기비용을 산정하기 위한 단위 시공비용은 표 3에 나타내었으며, 적용기준은 '중합물가정보' (2000년 11월)를 근거로 하였다. 설계와 하중재하시험 비용은 전문가의 경험에 의한 시공비용의 비율로 결정하였고⁽⁷⁾ 유지관리 비용은 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(1995)에 근거하여 초기비용의 10%로 하였다. 본 적용 예에 적용된 초기비용과 유지관리 비용은 표 4에 나타내었다.

5.1.2 보강기대비용

2.2절에서 언급한 바와 같이 보강기대비용은 보수·보강과 같은 직접비용과 도로이용자비용 및 간접적 지역 경제손실비용과 같은 간접비용으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 강도, 사용성, 피로 한계상태에 도달 시 교량의 보수·보강 공사기간 동안 교량의 기능상의 장애로 발생할 수 있는 도로이용자 비용을 추정하기 위해 식(6)~식(9)와 같은 NIST(National Institute of Standard and Technology)의 도로이용자 비용 모델을 사용하였다.

표 3. 주형과 바닥판의 단위 시공비용

	재료 비용 (×1,000 won/ton)	제작 비용 (×1,000 won/ton)	총 시공비용 (×1,000 won/ton)
주형	350	442	792
강 바닥판	350	513	863

표 4. 생애주기비용 계산을 위한 초기비용과 유지관리비용

초기비용 ($C_0 = C_{OD} + C_{OC} + C_{OT}$)	설계비용 (C_{OD})	$7\% \times C_0$
	시공비용 (C_{OC})	$90\% \times C_0$
	사용전 하중 재하 시험 비용 (C_{OT})	$3\% \times C_0$
유지관리비용 (C_M)	일상점검 (1년마다 수행) 상세점검 (5년마다 수행)	$10\% \times C_0$

$$C_T = C_{TDC} + C_{VOC} + C_{AC} \quad (6)$$

$$C_{TDC} = \left(\frac{L}{S_a} + \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times w \quad (7)$$

$$C_{VDC} = \left(\frac{L}{S_a} + \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times r \quad (8)$$

$$C_{AC} = L \times ADT \times N \times (A_a - A_n) \times C_a \quad (9)$$

여기서, C_T =도로이용자 비용, C_{TDC} =시간지연 비용, C_{VOC} =차량운행비용, C_{AC} =사고비용, L =차가 운행하거나 도로 방향에 영향을 받는 길이, S_a =교량의 운영 기간동안의 교통 속도, S_n =정상상태의 교통 속도, ADT =평균 일일 교통량, N = 공사 기간, w =운전자의 시간 가치, r =개인용 차량에 대한 상업용 차량의 비에 근거한 가중 평균 차량 비용, C_a =사고당 비용, A_a, A_n =공사기간과 정상 상태에서의 운행 거리(km) 당 사고율이다.

본 예제에서는 강도, 사용성, 피로에 대한 보강 방법은 각각 개장(retrofit), 프리스트레싱(prestressing), 새로운 볼트이음(Bolting)으로 가정하였으며, 종합물가정보(2000년 11월)와 시공 및 보수·보강과 관련한 전문가의 견해, 김포의 규연대교 작업 시의 공사자료를 근거로 각각의 보강 방안에 대한 초기 비용의 비율로 나타낸 보강직접비용과 요구 작업일수는 표 5과 같다.

보강공사 시에 생기는 간접적인 기대 손실비용인 도로이용자 비용을 산정하기 위해서 NIST의

BRIDGE LCC 프로그램으로 계산하였다. 일일 도로 교통자료는 한국교통개발 연구원(KOTI)의 통계 자료(<http://traffic.metro.seoul.kr>)를 근거로 서울시 한강상의 통행량인 140,000대로 가정하였으며, 교량의 평상시 통행속도는 60km/h, 보강작업 시 30km/h로 가정하였다. 운전자의 시간 가치는 교통개발 연구원 조사자료(1994)를 근거로 하여 21,517원/인/hr로 하였다. 사고당 비용은 NIST의 자료를 근거로 하여 120,000,000원, 보강공사동안의 사고율은 2.2%/백만대/mile, 평상시 사고율은 1.9%/백만대/mile로 하였다. 이상과 같은 자료를 이용하여 하루에 소요되는 도로이용자 비용은 4,427,000,000원으로 계산되었다. 간접적 기대손실 비용의 또 다른 요소인 간접적 지역 경제손실비용은 도로이용자비용의 50~150%정도로 적용할 수 있다고 하였다⁽²⁰⁾. 이에 본 연구에서는 이러한 간접적 지역경제손실 비용을 도로이용자비용과 같은 것으로 가정하였다. 이와 같은 보강 간접비용은 표 5에서 알 수 있듯이, 보강기간에 근거한 간접비용이 총 보강기대비용의 산정에 있어서 가장 지배적인 인자이며, 이것은 LCC의 평가에서 실제 기대되는 보강 작업 기간을 사용하는 것이 더욱 적절하다고 사료된다.

5.2 통계적 불확실량

본 연구에서 체계신뢰성해석을 수행하기 위한 통계적 불확실량은 표 6에 나타낸 바와 같다. 그러나 재료강도와 하중변수를 제외하고는 불확실량의 본질적인 특성이나 관련데이터의 부족으로

표 5. 보강방법에 대한 소요 작업일수와 총 보강기대비용

구분	개장		프리스트레싱		볼트이음	
	Case I	Case II	Case I	Case II	Case I	Case II
소요작업일수	6개월	8개월	2주	1개월	2개월	3개월
직접비용	1.542 C_o	1.285 C_o	0.041 C_o	0.034 C_o	0.092 C_o	0.077 C_o
간접비용	724.4 C_o	959.4 C_o	60.36 C_o	119.8 C_o	241.46 C_o	359.8 C_o
총 보강기대비용	725.94 C_o	960.7 C_o	60.40 C_o	119.83 C_o	241.7 C_o	359.9 C_o

Case I : 긴급 보강공사, Case II : 통상적인 보강 공사

표 6. 저항, 사하중, 활하중 불확실량

구분	저항	사하중	활하중
평균공칭비	1.1	1.05	1.24
C O V	0.12	0.1	0.25
분포형	Normal	Normal	Lognormal

인하여 국내·외의 관련연구^{(9),(14),(25)}을 참조하였고, 주로 경험과 판단에 의존하여 국내의 현실을 고려하는 값으로 추정하였다.

5.3 LCC 최적설계의 결과

강상판 교량의 최적 LCC설계의 효과를 분석하기 위하여, 5.1절에서 나타난 바와 같은 초기비용, 유지관리비용과 보강기대비용 Case I을 적용한 LCC최적설계 I, 보강기대비용 Case II를 적용한 LCC최적설계 II에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 강상판 교량 시스템의 최적 부재 배치(frame work)를 결정하기 위하여, 폐단면 리브와 가로보의 간격을 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. 표 7은 각각의 다른 설계기준에 대한 최적설계 결과를 정리한 것이다.

LCC설계를 얻기 위해 실제 재래적 설계에서 사용되는 응력한계와 같은 적정 허용응력비가 사용될 수 있으므로⁽²⁷⁾, 적정응력비가 적용된 초기비용 최적설계와 LCC 최적설계 결과를 비교·분석하기 위해 허용응력 변화(허용응력의 60%~100%)에 따른 초기비용 최적설계를 수행하였으며, 각각에 대한 총 기대 LCC를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보여주는 바와 같이 본 적용예와 같은 구조물에서는 허용응력 적용비율이 약 75%를 적용한 최적설계가 최적 LCC 설계로 이루어짐을 알 수 있다. 이에 대한 최적설계 결과는 또한 표 7에 나타내었다.

표 7에 나타난 바와 같이 LCC 최적설계 I, LCC 최적설계 II, 그리고 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계에 대한 최적의 U-리브 간격, 가로보의 간격, 그리고 바닥판의 두께는 각

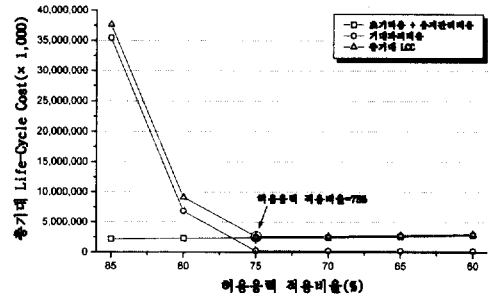


그림 7. 허용응력 변화에 따른 총기대 LCC

각 68cm, 200cm과 U-리브간격과 가로보간격에 대한 최소두께인 16mm로 동일하게 나타난 반면, 초기비용 최적설계에서는 62cm, 300cm, 그에 따른 최소두께인 14mm로 나타났다. 또한 각 설계방법에 따른 주형의 최적 높이를 보면, LCC 최적설계 I, II, 그리고 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계에서는 내부지점 1과 2에 대해 각각 750cm, 900cm인 반면, 초기비용 최적설계에서는 650cm, 750cm이다. 즉 LCC 최적설계와 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계의 주형 높이는 초기비용 최적설계보다 약 15%, 20% 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 LCC를 고려한 강상판교의 최적의 부재배치는 U-리브의 간격과 높이는 늘리고, 가로보의 간격은 줄이는 것이 유리하다고 할 수 있다.

그림 8은 표 7의 각 설계방법에 따른 초기비용만을 비교하여 나타난 그래프이다. 초기비용 최적설계에 대한 최적 설계비용은 1,749,898천원인 반면, LCC 최적설계 I과 II는 각각 1,840,220천원, 1,878,799천원이고, 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계는 2,181,240천원, 재래적설계의 초기비용은 1,946,534천원이다. 이 결과로부터 LCC 최적설계에 의한 초기비용은 초기비용 최적설계의 초기비용과 비교할 때 각각 5~7%정도 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 LCC 최적설계에 의한 초기비용은 초기비용 최적설계의

표 7. 각 CASE별 최적설계 결과

		재래적 설계	초기비용 최적설계	LCC 최적설계I	LCC 최적설계II	허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계
가로보 간격		200	300	200	200	200
U-리브 간격		62	62	68	68	68
복부 두께 (mm)	그룹1	16	10	10	10	10
	그룹2	14	10	10	10	12
	그룹3	14	10	10	10	10
	그룹4	14	10	10	10	10
	그룹5	14	12	10	10	14
	그룹6	14	10	10	10	10
	그룹7	14	10	10	10	10
	그룹8	14	10	10	10	10
	그룹9	16	10	10	10	14
하부 플렌지 두께 (mm)	그룹1	14	10	10	10	10
	그룹2	18	10	12	14	14
	그룹3	14	10	14	16	16
	그룹4	20	10	10	10	10
	그룹5	26	18	10	10	16
	그룹6	20	10	20	24	24
	그룹7	16	10	12	16	16
	그룹8	22	10	10	10	10
	그룹9	28	12	10	10	16
거더 높이 (cm)	지간 중앙부	300	250	300	300	300
	내부 지점부1	650	450	750	750	750
	내부 지점부2	750	670	900	900	900
바닥판 두께(mm)		14	14	16	16	16
U-리브 형식		3	1	3	3	3
가로보	복부높이(cm)	100	115	110	110	150
	복부두께(mm)	14	10	10	10	10
	플렌지두께(mm)	14	10	10	10	10
초기비용(×1,000원)		1,946,534	1,749,898	1,840,220	1,878,799	2,181,240
유지관리비용(×1,000원)		194,653	174,990	184,022	187,880	218,124
강도보강기대비용(×1,000원)		828	3,014,173	1,518	528	233
사용성보강기대비용(×1,000원)		272,095	71,061,168	6,942	70,145	24,907
피로보강기대비용(×1,000원)		719,857	49,425,624	5,563	7,675	1446
총 기대비용(×1,000원)		3,133,968	125,425,853	2,038,265	2,145,027	2,425,950

초기비용과 비교할 때 약간 크게 나타나지만 각각 다른 보강기대비용을 적용한 LCC 최적설계I, II의 초기비용은 거의 비슷하게 나타났음을 알 수 있다.

그림 9는 표 7의 각 설계방법에 따른 총 기대 LCC를 비교하여 도식적으로 보여주고 있다. 재래적 설계의 총 기대 LCC는 3,133,968천원, 초기비용최적설계의 총 기대 LCC는 125,425,853천원인 반면, LCC 최적설계I, LCC 최적설계II는 각각 2,038,265천원, 2,145,027천원, 허용

응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계는 2,425,950천원으로 LCC 최적설계의 결과와 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계결과는 초기비용 최적설계나 재래적 설계에 비해 훨씬 경제적임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 초기비용 최적설계에 의한 강도, 사용성, 피로에 대한 파괴확률은 LCC 최적설계나 허용응력의 75%를 적용한 초기비용 최적설계와 비교할 때 훨씬 높은 파괴확률을 내포하고 있음을 의미한다.

6. 결론

본 연구에서 적용 예를 통하여 강상판교의 최적 LCC 설계에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) LCC 최적설계에 의한 최적의 부재배치 (framework)는 재래적인 설계나 초기비용 최적설계에와 많은 차이가 있으며, 제안된 LCC 최적설계 방법을 적용함으로써 교량의 강상판-주형 시스템의 최적의 부재 배치를 쉽게 얻을 수 있다.
- (2) LCC 최적설계에 의한 초기 비용은 초기 비용 최적설계에 의한 초기 비용보다 많지만, 최적 LCC설계는 총 기대 LCC를 현저하게 감소시킬 수 있다.
- (3) 총 보강기대 비용을 산정함에 있어서 보수 혹은 보강 기간은 매우 지배적인 인자이며 LCC 비용 평가에서 실제 기대되는 보강 작업기간을 사용하는 것이 더욱 바람직하다.
- (4) LCC측면에서 최적인 허용응력 비율을 사용한 초기비용 최적설계는 간접적으로 LCC 최적설계를 수행할 수 있어 실용적인 방법이다.
- (5) 본 연구에서 제안한 LCC에 입각한 강상판 교량의 최적 설계는 재래적인 설계법 뿐만 아니라 기존 초기 비용 최적 설계와 비교하여 더 합리적이고, 경제적이며, 안전한 설계를 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1998년도 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. Albrecht, P. (1983). "S-N Fatigue Reliability

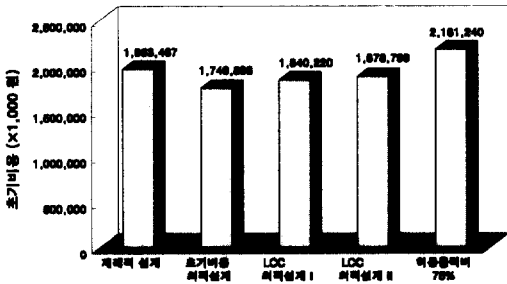


그림 8. 각 CASE에 대한 초기비용

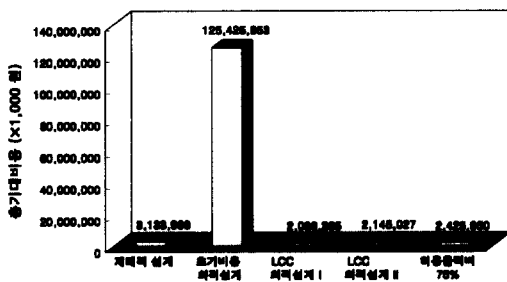


그림 9. 각 CASE에 대한 총기대비용

또한 주목해야 할 사항은 LCC 최적설계의 두 가지 경우인 LCC 최적설계 I, II의 LCC는 초기 비용을 비교했을 때와 마찬가지로 약 5%정도차이로 거의 같다. 결국 최적 LCC설계에서 보강기대 비용의 변동량은 중요한 역할을 하고 있지 않는 것으로 판단된다. 따라서 설계단계에서 기대보강비용을 산정함에 있어 정밀한 해석 보다는 근사적 추정으로도 최적 LCC 설계를 유도할 수 있다고 판단된다. 한편 허용응력비 75%를 적용한 초기비용 최적설계는 엄밀한 LCC 최적설계와 비교해 볼 때 매우 유사한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 이는 초기비용 최적설계를 수행하더라도 LCC 측면에서 최적의 설계를 유도 할 수 있도록 최적의 목표 신뢰수준을 간접적으로 반영하는 허용응력 비율을 사용한다면 LCC 최적설계와 유사한 설계결과를 얻을 수 있음을 보여주는 것으로 암시적으로 LCC를 고려한 최적설계를 실용적으로 수행할 수 있다.

- Analysis of Highway Bridges." Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Application for Structural Design and Maintenance, ASTM STP 798.
2. Ang, A. H-S. and Tang, W. H. (1984). "Probability Concepts in Engineering Planning and Design." Vol. I and II, John Wiley.
 3. Berz, M., Bischof, C., Corliss, G., and Griewank, A., eds. (1996). "Computational differentiation-techniques, tools, and applications." Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
 4. Bichof, C., Carle, A., Corliss, G., Griewank, A., and Hovland, P. (1992). "ADIFOR-generating derivative codes from FORTRAN 77 programs." Scientific Programming, 1(1), 11-29.
 5. Bischof, C., Carle, A., Khademi, P., and Mauer, A. (1996a). "The ADIFOR2.0 system for the automatic differentiation of FORTRAN 77 programs." IEEE Computational Sci. and Engrg., 3(3), 18-32.
 6. Bischof, C., Roh, L., and Mauer, A. (1996b). "ADIC-an extensible automatic differentiation tool for ANSI-C." Preprint ANL/MCS-P626-1196, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill.
 7. de Brito J. and Branco, F. A. (1995). "Bridge Management Policy using cost analysis." Proc. Instn Civ. Engrs Structs and Bldgs, 104, Nov., 431-439.
 8. Carroll, D.F. (1998). FORTRAN Genetic Algorithm (GA) Driver Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801.
 9. Cho, H. N., Ang, A. H-S.(1989), "Reliability Assessment And of Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges," 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp 2235-2238.
 10. Ellingwood, B. R., Galambos, T. V., Macgregor, J. C., and Cornell, C. A. (1980). "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58." National Bureau of Standard SP-577, Washington, D.C.
 11. Frangopol, D. M., and Lin, K. Y. (1997). "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 10.
 12. Griewank, A., and Corliss, G. F., eds. (1991). Automatic differentiation of algorithms : theory, implementation, and application. Society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
 13. Griewank, A., Juedes, D., and Utke, J. (1996). "ADOL-C: a package for the automatic differentiation of algorithms written in C/C++: ACM Trans." on Mathematical Software, 22(2), 131-167.
 14. Hart, G. C. (1982). "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering." Prentice-Hall.
 15. Koskito, O. J., and Ellingwood, B. R. (1997). "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures." J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3.
 16. 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.
 17. Melchers, R. E. (1987). "Structural Reliability, Analysis and Prediction." Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England.
 18. Ministry of Construction and Traffic (1996). 'The Korean Design Bridge Code(KBDC)." Roastaing, N., Dalmas, S., and Galligo, A. (1993). "Automatic differentiation in ODYSSEE." Tellus, 45a(4), 558-568.
 19. Rosenblueth, E. (1986). "Optimum Reliabilities and Optimum Design." Struct. Safety, 3(2), 69-83.
 20. Seskin, S. N. (1990). Comprehensive framework for highway economic impact assessment methods and result.

- Transportation Research Record 1274, Transportation Research Board, Washington, D.C., 24-34.
21. Shiriaev, D., and Griewank, A. (1996). "ADOL-F: Automatic differentiation of FORTRAN codes." Computational differentiation-techniques, tools, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa., 375-384.
 22. Vanderplaats, Garret N. (1986). "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis." Engineering Design Optimization, INC, Santa Barbara, California.
 23. Vanderplaats, Garret. N. (1984). "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill.
 24. 도로교설계기준(2000). 사단법인 도로교통협회
 25. 이광민(2000). "강상판교의 최적 Life-Cycle Cost설계.", 석사학위논문, 한양대학교
 26. 조효남, 이두화, 정지승, 민대홍(1999a). "신뢰성에 기초한 강상형교의 단면 최적설계.", 대한토목학회 논문집, 19(I-3), 397-406.
 27. 조효남, 민대홍, 김구선(1998). "강상자형교의 최적 Life-Cycle Cost설계.", 전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집
 28. 조효남, 정지승(1999). "효율적인 재해석 기법에 의한 강상자형교의 최적설계.", 강구조학회 논문집, 11권 5호
 29. 조효남, 민대홍, 조준석(2000). "고속철도 강교량의 Life-Cycle Cost 최적설계.", 전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집

(접수일자 : 2001년 4월 13일)