

# 강박스 거더의 생애주기비용 최적설계

## Optimal Life-Cycle Cost Design of Steel Box Girders

신 영 석\*                      박 장 호\*                      이 현 섭\*\*                      안 예 준\*\*\*  
Shin, Yung-Seok              Park, Jang-Ho                  Lee, Hyun-Sub                  Ahn, Ye-Jun  
(논문접수일 : 2005년 5월 10일 ; 심사종료일 : 2005년 9월 2일)

### 요 지

본 논문에서는 강박스 거더의 생애주기비용을 최소화하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서 고려된 강박스 거더의 생애주기비용은 초기비용, 유지관리비용 및 보수비용으로 구성되었다. 강제 주형의 상태등급곡선과 안전진단 결과 측정된 내하력을 바탕으로 내하력곡선을 추정하였으며, 이 곡선을 이용하여 생애주기비용을 고려한 강박스 거더의 최적설계를 수행하였다. 또한 내하력곡선을 통해 강박스 거더의 공용수명과 보수·보강 시기 및 횟수를 결정하고 초기 내하력에 따른 생애주기 동안 발생하는 연간비용을 비교, 분석하였다. 본 논문에서 제안한 생애주기비용을 고려한 강박스 거더의 최적설계를 통하여 기존의 설계에 비해 보다 경제적이며 안전한 설계를 유도할 수 있으리라 판단된다.

**핵심용어** : 생애주기비용, 상태등급곡선, 내하력곡선, 강박스 거더, 최적설계, 실질할인율

### Abstract

This paper presents a design method to minimize Life Cycle Cost (LCC) of steel box girders. The LCC considered in this paper includes initial cost, expected life-cycle maintenance cost and repair cost. A load carrying capacity curve is derived from a condition grade curve of steel girders and load carrying capacity that is measured in safety diagnostic test. And then, optimal design of steel box girders is performed on the basis of load carrying capacity curve. In this paper time and number of times for repair of steel girders are determined based on the calculated load carrying capacity curve. Also, annual costs considering real discount rate are compared and analyzed in various cases. It is concluded that the optimal design of steel box girders considering LCC by the presented method will lead to more economical and safer girders than conventional design.

**keywords** : Life Cycle Cost, condition grade curve, load carrying capacity curve, steel box girder, optimal design, real discount rate

## 1. 서 론

최근 교량구조물의 설계 시 다수의 구조형식에 대한 설계대안을 검토 후 최저의 생애주기비용(LCC: Life Cycle Cost)으로 최상의 가치를 창출하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다(David, 1997). 이러한 연구의 일환으로 최근 건설교통부에서는 '공공건설사업 효율화 종합대책(1999)'에서 LCC 분석제도 도입에 대한 제도적 근거를 마련하여 공공사업에 있어 LCC 분석제도의 시행을 추진하고 있다.

구조물의 생애주기비용이란 건설계획 단계에서부터 폐기 처분 단계까지의 생애주기 동안에 발생하는 직·간접적인 모든 비용의 총합을 의미하며, 대부분의 경우 초기 직접비용보다는 보수·보강을 비롯한 불확실성을 갖는 항목들에 의한 간접비용이 구조물의 생애주기비용에서 큰 비중을 차지한다. 따라서 생애주기비용을 고려한 구조물의 가치를 판단하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요하며, 최근 들어 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 하지만 국내에서는 LCC 분석에 대한 평가기준의 부재와 LCC 산정을 위한 교량의 과거 이

\* 책임저자, 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학과 교수  
전화: 031-219-2505 ; Fax: 031-219-2501

E-mail: ysshin@ajou.ac.kr

\* 아주대학교 환경건설교통공학과 조교수

\*\* 아주대학교 환경건설교통공학과 석사과정

\*\*\* 아주대학교 환경건설교통공학과 박사수료

\* 이 논문에 대한 토론을 2006년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

표 1 구조물의 손상 판정기준(시설안전기술공단)

판정구분	상태	필요조치사항
A	문제점이 없는 건전하고 양호한 상태	필요 없음
B	경미한 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 기능발휘에 지장이 없는 상태로써 적은 양의 보수가 필요할 수 있음	필요 없음
C	보통의 손상, 결함, 열화가 발생하였으나 구조적으로는 안정하며 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요한 상태	보수조치 필요함 보수시(C→B)
D	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 내하성능에 지장을 초래할 우려가 있어 통과하 중 제한을 검토해야 하며, 시급한 보수·보강이 필요한 상태	보강조치 필요함 보강시(D→B)
E	주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 안정성에 위험이 있어 통과하중 제한이 시급한 상태로써, 임시조치 후 사용하거나 즉각 시설물의 부분 사용금지 또는 보강·개축이 필요한 상태	보강·개축조치 필요함

력자료의 부족으로 LCC의 체계적인 적용이나 평가에 있어서 어려움이 있는 실정이다.

한편 교량구조물의 설계에 있어서 기존의 반복계산에 의한 설계단면 결정과 달리 최적설계 기법을 이용하여 최적의 교량 단면을 선정하기 위한 연구사례가 다수 보고되고 있다. 과거의 연구에서는 교량의 초기 건설비용이나 재료비만을 목적함수로 선정하여 최적설계를 수행했던 것과는 달리 최근에는 교량구조물의 생애주기비용을 목적함수화하여 교량구조물의 최적설계가 이루어지고 있다(고현무 등, 2001; 조효남 등, 2001; Andre 등, 2004; Sarma 등, 2002).

본 논문에서는 생애주기비용을 고려한 교량의 강박스 거더에 대한 최적설계 방법을 제시하였다. 본 논문에서 고려한 LCC 함수는 초기비용, 유지관리비용 및 보수비용만으로 구성되었으며, 이를 목적함수화 하기 위하여 강제 주형에 대한 상태등급곡선과 안전진단결과 측정된 내하력을 바탕으로 내하력곡선을 추정하였다. 이 곡선을 이용하여 LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계를 수행하여 교량의 초기 내하력에 따른 공용수명과 보수·보강의 시기 및 횟수를 결정하였으며 생애주기 동안의 연간비용을 비교, 분석하였다.

2. 강제 주형의 내하력곡선 추정

구조물의 초기 내하력에 따른 공용수명을 평가하기 위하여 시설안전기술공단에서 제시한 상태등급곡선과 정밀안전진단에 의한 교량의 이력자료를 이용하여 보수·보강되지 않은 강제 주형에 대한 내하력곡선을 추정하였다.

2.1 상태등급곡선

시설안전기술공단의 “시설물의 상태평가 기준 정립(교량)(2000)”에 따르면 구조물의 손상정도를 다음 표 1과 같이 5개 등급으로 분류하고 있으며, “도로교의 공용수명 연장방안 연구(2000)”에서는 공용수명에 따른 상태등급의 변화를 그

림 1과 같이 제시하고 있다(시설안전기술공단, 2000; 한국건설기술연구원, 1999).

그림 1의 강제 주형에 대한 상태등급곡선은 현재 체계적인 교량 내하력에 대한 이력자료가 미진한 국내의 현실을 고려한 전문가들의 의견을 수렴하여 회귀분석한 결과이며, 경제성 분석에서의 LCP(Life Cycle Profile)를 추정하기 위하여 개발되었다. 또한 LCP에는 여러 가지 불확실한 인자 내지는 관리자의 결정을 필요로 하는 인자들이 포함되어 있기 때문에 이것을 구성하기 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다.

- 1) 보강비용은 보수비용보다 월등히 크기 때문에 보수조치는 보강조치보다 선행한다.
- 2) 상태등급이 C일 경우에 보수대안을 선택하며, 상태등급이 D일 경우에 보강대안을 선택한다.
- 3) 보수대안일 경우 상태등급의 향상은 1단계, 보강대안의 경우에는 2단계를 향상시킨다.
- 4) 상태등급이 E일 경우에는 교체대안을 선택하며, 교체된 부재의 상태등급은 A로 고려한다.
- 5) 성능개선 조치시점에서의 상태등급곡선은 원래의 상태등급곡선을 수평이동시켜 적용한다.

표 1에 나타난 바와 같이 각 상태등급은 구조물의 내하력 감소 정도를 가늠할 수 있다. 즉, A와 B등급의 경우 구조물

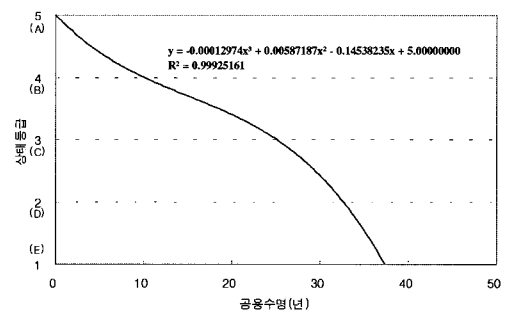


그림 1 강제 주형의 상태등급곡선

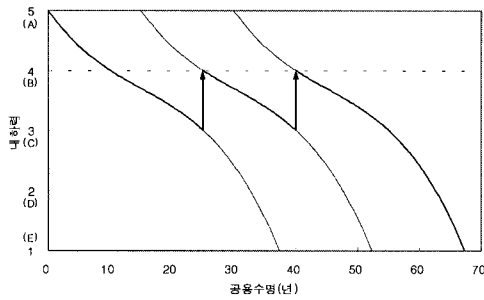


그림 2 보수이력을 고려한 강재 주형의 이력곡선

의 내하력 저하는 거의 발생하지 않으며 C등급 이하로 구조물의 상태가 저하될 경우 내하력이 급격히 감소할 우려가 있기 때문에 상태등급 개선을 위한 보수 또는 보강조치가 필요하다. 이러한 보수·보강 시 내하력 감소를 막을 수 있으며 그림 2의 경우 이러한 보수조치로 인하여 교량의 상태 등급을 일정하게 유지할 수 있는 이력곡선을 제시하고 있다. 그러나 이러한 보수에 의한 상태등급의 개선은 구조물의 내하력 측면에서는 단지 시간에 따른 내하력의 감소정도를 낮추는 역할을 하기 때문에 상태등급곡선과는 달리 구조물의 공용수명을 반복하여 연장시킬 수는 없다. 따라서 구조물의 전체적인 공용수명의 결정은 다음에 제시 할 구조물의 내하력 감소 곡선과 병행하여 평가하고자 한다(Bojidar, 2000; Hugh, 2003).

## 2.2 내하력곡선

교량의 내하력(Load Carrying Capacity)은 작용하는 하중을 안전하게 지지할 수 있는 교량의 하중저항능력을 의미하는 것으로 공용중인 교량은 사하중을 지지하고 있는 상태이므로 일반적으로 교량 내하력은 교량을 안전하게 통행할 수 있는 활하중의 크기 또는 활하중의 한계를 의미한다. 교량의 내하력은 교량평가는 물론 교량의 유지관리업무에 중요

한 자료로 활용되므로 정확하게 산정되어야 하는데 국내에서는 보편적으로 재하시험과 계산을 병행한 내하력 산정방법을 사용하고 있다. 내하력을 구하는 방법으로는 크게 허용응력법과 강도설계법으로 나눌 수 있으며 일반적으로 콘크리트교의 경우에는 강도설계법, 강교의 경우에는 허용응력설계법으로 산정되어진다. 한편, 국내 교량구조물에 대한 체계적인 정밀안전진단과 그에 따른 보수·보강은 현재 매우 활발히 진행되고 있으나 그 기간이 오래되지 않아 각 교량에 따른 체계적인 이력곡선은 전무한 상황이다. 또한 대부분의 교량이 정밀안전진단을 시행한 후 전반적인 보수·보강을 실시하므로 강재 주형에 대하여 보수·보강이 적용되지 않은 순수한 내하력 변화 곡선을 구하기는 매우 어렵다.

본 논문에서는 준공 이후 2회 이상 정밀안전진단을 실시한 교량의 이력자료와 상태등급곡선을 이용하여 기울기와 공용수명이 각각 이력자료 및 상태등급곡선과 동일하도록 다음 그림 3과 같은 내하력곡선을 가정하였다.

그림 3에서 A, B, C 교량의 정밀안전진단 결과는 주형에 특별한 보수조치가 이루어지지 않은 경우이므로 내하력곡선의 초기 기울기 및 초기값을 산정하는 중요 요소로 선정되었으며 상태등급곡선에서 보수·보강이 이루어지지 않은 경우 공용수명 약 37년 후 상태 등급이 최저 수준인 E등급으로 하락하므로 내하력은 최저수준(=1.0)에 이른다고 가정하였다.

내하력의 변화량은 상태등급에 따라 결정되는데 상태등급이 낮아질수록 내하력곡선이 감소하는 기울기는 증가하게 된다. 때문에 그림 2, 그림 3에 나타난 바와 같이 강재 주형의 상태 등급이 C로 낮아졌을 때 보수작업을 통하여 B로 상태 등급을 개선하면 이후 내하력이 감소하는 기울기는 B상태로 개선되어 공용수명을 연장할 수 있다. 그림 3에서 A, B, C 교량의 경우 비교적 초기에 정밀안전진단이 이루어졌으며, 1차 안전진단 후 대부분의 주요 부재가 B 상태등급으로 판정

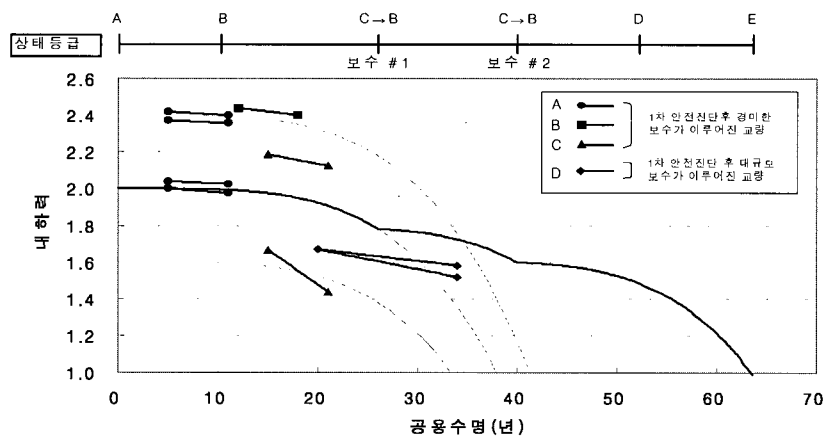


그림 3 보수이력에 따른 강재 주형의 내하력곡선

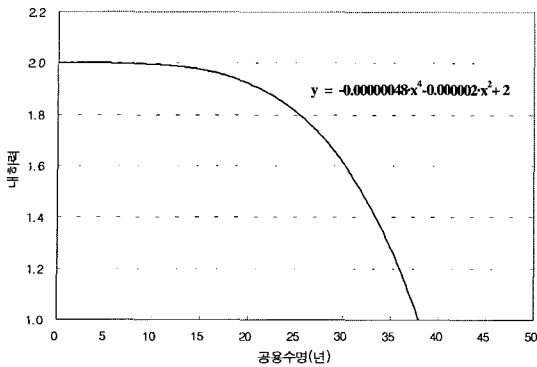


그림 4 강재 주형의 내하력곡선

되어 경미한 보수조치만을 취한 경우로서 가정된 내하력곡선과 기울기가 매우 근접함을 알 수 있다. 또한, D 교량의 경우 준공 후 20년이 지난 후 1차 정밀안전진단을 수행하였으며, 상태등급이 C등급 이하로 판정되어 전반적인 주형의 보수와 기타 부재의 보강이 이루어진 경우로 이 경우 역시 1차 보수 이후 내하력곡선과 유사한 기울기를 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 결과들로부터 그림 4와 같은 강재 주형의 내하력곡선을 추정하였다.

### 3. LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계

본 논문에서 제안하는 LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계는 다음과 같이 이루어진다. 결정된 바닥판의 단면과 가정한 주형의 초기단면에 의해 구조해석을 수행하여 부재력을 산출하고 이 부재력이 도로교설계기준(2000)에 의거한 설계 제약조건과 안전진단결과와 상태등급곡선을 고려한 내하력에 관한 제약조건을 만족시키는 범위내에서 반복계산을 수행하여 실질할인율을 고려한 연간비용을 최소로 하는 주형 단면을 결정한다. 본 논문에서는 대상교량의 최대 정모멘트 구간에 대해 LCC를 고려한 최적설계를 수행하여 강박스 거더의 최적설계 단면을 결정하였다. 여기서, 최적설계기법은 SQP (Sequential Quadratic Programming)를 사용하였다 (Raphael 등, 1992).

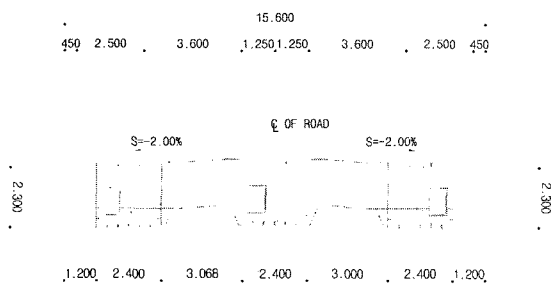


그림 6 대상교량 단면도(단위:mm)

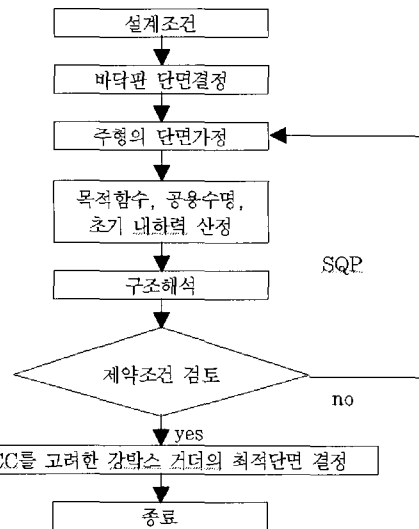


그림 5 LCC를 고려한 최적설계 흐름도

### 3.1 최적설계 대상교량

LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계에 대한 효과를 고찰해 보기 위해, 경기도 여주군 양평면에 건설될 전형적인 강교량의 형태인 강박스 거더교(steel box girders bridge)를 대상교량으로 선정하였다. 설계조건은 1등급(DB-24, DL-24) 교량으로서 4경간 연속교이며(55.15m+55.00m+60.00m+55.15m) 교폭은 15.60m, 주형의 폭은 2.40m이다.

### 3.2 설계변수

본 논문에서는 대상교량인 강박스 거더의 최대 정모멘트 구간의 주형 상·하부플랜지 두께, 복부판의 높이와 두께 및 상·하부리브, 종·횡리브, 수직·수평보강재의 치수를 설계변수로 설정하였으며, 주형의 폭은 264cm, 리브의 개수는 상부 5개 하부 2개 및 수직·수평보강재의 간격은 125cm로 주어진 대상교량의 기존 설계값과 동일하게 적용하였다.

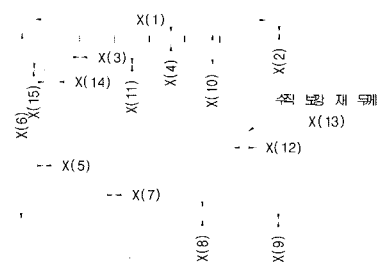


그림 7 주형 단면도

### 3.3 설계 제약조건

도로교설계기준에 의거하여 설계 제약조건을 다음과 같이 설정하였다(한국도로교통협회, 2005).

· 강재의 최소두께 또는 최소폭

$$G(1) \sim G(15) = \frac{t_{\min}}{t} - 1 \leq 0 \quad (1)$$

$t_{\min}$ : 부재 최소두께,  $t$ : 부재 두께

· 강재의 최대두께 또는 최대폭

$$G(16) \sim G(30) = \frac{t}{t_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$t$ : 부재 두께,  $t_{\max}$ : 부재 최대두께

· 주형 상 · 하부플랜지 휨응력

(합성전+합성후+크리프+건조수축±온도)

$$G(31) \sim G(42) = \frac{f}{f_{sa}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$f$ : 강재 휨응력,  $f_{sa}$ : 강재 허용휨응력

· 합성전+합성후 전단응력

$$G(43) = \frac{v}{v_a} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

$v$ : 강재 전단응력,  $v_a$ : 강재 허용전단응력

· 복부판 폭/두께비 (수평보강재 1단)

$$G(44) = \frac{t}{209 \cdot b} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$b$ : 복부판 폭,  $t$ : 복부판 두께

· 슬래브 상 · 하부 휨응력

$$G(45) \sim G(56) = \frac{f}{f_{ca}} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$f$ : 콘크리트 휨응력,  $f_{ca}$ : 콘크리트 허용휨응력

· 합성응력

$$G(57) \sim G(58) = \left(\frac{f}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{v}{v_a}\right)^2 - 1.2 \leq 0 \quad (7)$$

· 슬래브 압축연 항복응력

$$G(59) \sim G(60) = \frac{\sum f}{0.6 f_{ck}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$\Sigma f$ : 응력조합,  $f_{ck}$ : 콘크리트 압축응력

· 주형 상 · 하부플랜지 항복응력

$$G(61) \sim G(64) = \frac{\sum f}{f_y} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

$\Sigma f$ : 응력조합,  $f_y$ : 강재 항복응력

· 종 · 횡리브 단면조건

$$G(65) \sim G(69) \leq 0 \quad (10)$$

· 수직 · 수평보강재 단면조건

$$G(70) \sim G(75) \leq 0 \quad (11)$$

· 강재 주형의 내하력

$$G(76) = \frac{f_a - f_{\text{사하중+크리프+건조수축}\pm\text{온도}}}{f_i(1+i) \times \text{초기내하력}} - 1 \leq 0$$

$f_a$ : 허용응력,  $f_{\text{사하중+크리프+건조수축}\pm\text{온도}}$ 에 의한 응력

$f_i$ : 설계 활하중에 의한 응력,  $i$ : 충격계수

### 3.4 실질할인율

교량의 공용수명 동안 발생하는 비용을 산정하는데 있어 중요한 요소인 할인율은 돈의 시간가치를 나타내는 계수로써 발생시기가 서로 다른 비용을 일정한 기준시점으로 등가환산 해 주는 것으로 시간경과에 따른 이자율과 물가변동효과를 고려하여 결정되는 것이다(안장원 등, 2001).

$$i = \frac{1 + i'}{1 + j} - 1 \quad (13)$$

$i$ : 실질할인율,  $i'$ : 명목할인율,  $j$ : 물가상승률

LCC 비용을 분석하는 방법으로는 크게 현재가치법(現在價値法)과 연등가액법(年等價額法)이 있는데 현재가치법은 교량의 공용수명 동안 발생하는 모든 비용을 현재 시점으로 환산하는 방법이고 연등가액법은 발생한 모든 비용을 균일한 연간비용으로 환산하는 방법이다. 본 논문에서는 초기 내하력에 따른 공용수명이 각기 다르고 동일한 기준시점에 대해 LCC비용을 산정, 비교하는데 있어서 개축비용이나 잔존수명과 같은 비용항목의 불확실성이 크기 때문에 현재가치법이 아닌 연등가액법으로 초기 내하력에 따른 연간비용을 비교, 분석하였다. 연등가액법으로 비용을 산정하는데 있어서 우선 비용항목을 초년도비용(초기비용), 반복비용(유지관리비용), 비반복 비용(보수비용)으로 구분하여 현재가치로 환산된 생애주기비용을 산정한 뒤 매년 동일한 비용이 발생한다는 가정하에 식 (15)로 구한 실질할인율을 적용한 연간비용을 구함으로써 초기 내하력에 따른 LCC 비용을 합리적으로 비교, 분석할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 외환위기가 발생한 전 · 후의 경제지표가 상이함에 따라 1999년에서 2004년까지 과거 6년간의 자료인 표 2를 바탕으로 산출된 실질할인율 4.4%를 사용하고자 한다. 여기서, 명목할인율은 예금은행 대출금리를 사용하였다.

표 2 실질할인율의 변화추이(통계청, 한국은행, 2004)

년도	명목할인율	소비자물가지수	물가상승률	실질할인율
1997	11.83%	92.4	4.4%	7.9%
1998	15.18%	97.8	7.5%	1.5%
1999	9.4%	98.2	0.8%	7.1%
2000	8.6%	100.0	2.3%	4.9%
2001	7.7%	103.6	4.1%	3.3%
2002	6.7%	106.7	2.7%	5.2%
2003	6.2%	110.0	3.6%	4.1%
2004	5.9%	113.2	3.6%	4.5%
평균				4.4%

※ 주 : 소비자 물가지수는 2000년을 100으로 기준하여 산출된 것임.

· 현재가치로 환산된 생애주기비용( $E[C_T(X)]$ )

$$E[C_T(X)] = C_I(X) + E[C_m] + E[n \cdot C_R(t)] \quad (14)$$

· 연간비용( $C_Y(X)$ )

$$C_Y(X) = \frac{i(1+i)^{LC}}{(1+i)^{LC}-1} \times E[C_T(X)] \quad (15)$$

LC : 공용수명

### 3.5 목적함수

LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계 정식화를 위하여 교량의 공용수명 동안 발생하는 구조물의 생애주기비용을 현재가치로 산정한 뒤 실질할인율을 고려한 연간비용을 목적함수로 하여 식 (15)와 같이 구성하였다.

- 연간비용( $C_Y(X)$ ) : 현재가치로 환산된 생애주 기비용을 매년 동일한 비용이 발생한다는 가정하에 실질할인율과 공용수명을 고려하여 산정하였다.
- 생애주기비용( $E[C_T(X)]$ ) : 교량의 생애주기 동안에 발생하는 총 비용으로 본 논문에서는 식 (14)와 같이 초기비용, 유지관리비용, 보수비용만으로 구성하였다.
- 초기비용( $C_I(X)$ ) : 초기비용은 교량이 준공되기 전까지 발생하는 비용으로 계획, 설계비용 및 검증제하시험 비용을 제외한 주형제작 및 가설비용과 도장비용만으로 구성하였다. 비용산정 시 제작비용은 강재의 부피, 도장비용은 강재의 표면적을 함수화하였다.
- 유지관리비용( $E[C_m]$ ) : 완공된 시설물의 기능을 보전하고 시설물 이용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 시설물을 일상적으로 점검·정비 하는 것으로 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(2000)에 따라 초기비용의 10%로 산정하였다.

표 3 초기비용 산정기준

항 목	세부 항목	금 액
강교 제작 및 가설	제작	1,902,789 원/ton
	가조립	179,295 원/ton
	운반 및 가설	573,760 원/ton
강교 도장	표면처리	1,872 원/m <sup>2</sup>
	내부도장(공장)	13,591 원/m <sup>2</sup>
	외부도장(공장)	12,888 원/m <sup>2</sup>
	외부도장(현장)	3,164 원/m <sup>2</sup>
	외부도장면 도장(현장)	6,482 원/m <sup>2</sup>

· 보수비용( $E[n \cdot C_R(t)]$ ) : 교량 전문가에 의해 구성된 상태등급곡선(A~E단계)과 강교의 안전진단 결과 측정된 내하력을 바탕으로 추정된 내하력곡선을 이용하여 초기 내하력에 따른 보수시기( $t$ )와 횟수( $n$ )를 결정하고 이에 따른 강박스 거더의 공용수명 동안의 보수비용을 산정하였다. 보수비용에 대한 항목은 내하력 저하로 인한 볼트누락 및 체결불량에 대한 볼트교체 및 체결과 내·외부의 도장박리에 대한 보수도장으로 구성하였으며, 기타 보수비용에 대해서는 볼트와 도장비용의 10%를 추가로 고려하였다. 보수비용은 강재의 부피와 면적을 이용하여 산정된 보수비용과 초기 내하력에 의하여 결정된 보수횟수를 고려하여 결정하였다.

### 4. LCC를 고려한 강박스 거더의 최적설계 결과

초기 내하력을 1.2~2.0까지 변화시키며 앞 절에서 제시한 강박스 거더의 최적설계를 수행한 후 결과를 표 5와 그림 8에 나타내었다. 초기 내하력이 1.0인 경우 준공과 함께 내하력의 감소가 시작되므로 주형의 공용수명을 산정할 수 없다. 때문에 초기 내하력이 1.0인 경우의 생애주기비용은 고려하지 않았다. 내하력에 대한 추가 제약조건은 내하력에 근거를 둔 식 (12)로 고려하였다.

다음 그림 8은 초기 내하력 변화에 따른 최대 공용수명을 나타내고 있다. 각 경우에 대하여 보수 횟수를 2번으로 제한한 이유는 강재 주형의 경우 실제로 2회 이상 보수한 사례를 찾아보기 힘들고 상태 등급의 회복 또한 기대하기 어렵기 때문이다. 다만 2회 이상 전체 보수를 실시한 이후 상태 등급이 C등급 또는 D등급 이하로 낮아진 경우 보수·보강을 병행하여 상태 등급과 내하력을 동시에 향상시키는 대안이 있으나 일반적으로 강재 주형의 경우 내하력의 증진을 기대할 수 있는 효과적인 보강 방법이 적고 과도한 비용이 발생

표 4 보수항목에 따른 보수비용 및 소요일수

보수항목	보수비용(원/m <sup>2</sup> )
볼트교체 및 체결	5,000
도장박리(내부)	68,500
도장박리(외부)	45,000
기타	12,785

하는 반면 공용 내하력이 크게 증가하지 않으므로 본 논문에서는 보강 경우를 제외하였다.

1.2~2.0까지 초기 내하력을 변화시키며 최적설계를 수행한 결과 그림 8에 나타난 바와 같이 초기 내하력이 증가할수록 교량의 공용수명은 증가함을 알 수 있다. 그러나 초기 내하력이 증가함에 따라 공용수명의 증가량이 급격히 감소하여 전체 생애주기비용을 공용수명으로 나누어 산출한 연간비용은 감소하다가 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 초기 내하력 값이 작은 경우에는 보수가 1회 실시되지만 초기 내하력 값이 어느정도 이상이 되면 보수가 2회가 실시되어 보수에 소요되는 비용보다 공용수명이 늘어나는 정도가 작아서 교량의 연간비용이 증가하게 된다. 그러므로 교량의 공용수명을 연장시키기 위해서는 적절한 초기 내하력을 확보하여 설계를 수행한 후 지속적인 보수·보강을 실시하여 양호한 교량의 상태를 유지하는 것이 중요함을 알 수 있다. 또한 할인율은 LCC 및 투자계획에 상당히 큰 영향을 미치게 되므로 반드시 민감도 분석을 실시하여 실질할인율의 변화에 따른 LCC의 변화를 주의 깊게 살펴 볼 필요가 있다. 따라서 식 (15)를 사용하여 다양한 초기 내하력에 대해 실질할인율을 변화시켜가며 연간비용의 변화정도를 살펴보았다. 그림 9는 대상교량의 실질할인율의 변화에 따른 LCC를 고려한 연간비용과의 민감도를 분석한 결과이다(안장원 등, 2001).

초기 내하력에 따른 대상교량의 민감도 분석결과 실질할인율이 작은 경우 초기 내하력이 클수록 경제적이며 큰 경우 초기 내하력이 작을수록 경제적인 것으로 분석되었다. 이는

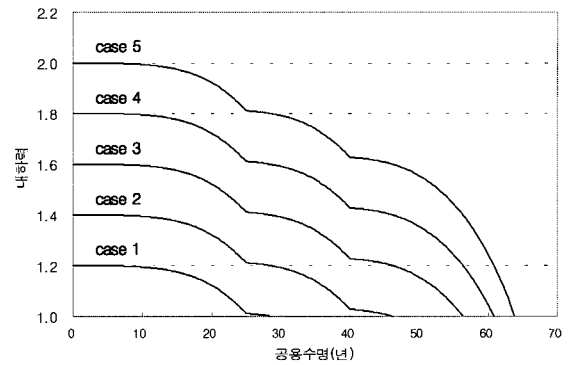


그림 8 초기 내하력에 따른 강재 주형의 공용수명

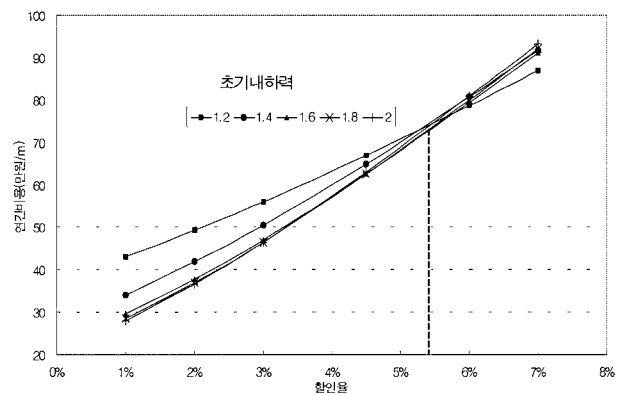


그림 9 민감도 분석

실질할인율이 작은 경우에는 초기 내하력의 증가에 따른 생애주기비용의 증가보다 공용수명의 증가가 상대적으로 커서 연간비용이 작아지는 것이고, 할인율이 큰 경우에는 초기 내하력의 증가에 따른 공용수명의 증가보다 생애주기비용의 증가가 더 커서 연간비용이 작아지는 것이다. 또한 실질할인율의 변화에 대해 초기 내하력이 클수록 연간비용의 변화가 더 민감하며 표 2에서 산출된 실질할인율 4.4%에 대해서는 초기 내하력이 1.6일 때 연간비용이 최소가 됨을 알 수 있다.

표 5 초기 내하력 변화에 따른 최적설계 결과

		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
		초기 내하력 = 1.2	초기 내하력 = 1.4	초기 내하력 = 1.6	초기 내하력 = 1.8	초기 내하력 = 2.0
상부 플랜지	폭 (mm)	2640	2640	2640	2640	2640
	두께 (mm)	11.9	11.9	12.0	12.1	12.2
복부판	높이 (mm)	1912	1912	1912	1912	1917
	두께 (mm)	9.2	9.1	9.1	9.1	9.2
하부플랜지	폭 (mm)	2640	2640	2640	2640	2640
	두께 (mm)	16.6	17.6	18.6	19.7	20.7
공용수명(년)		28.5	46.1	56.3	60.8	63.9
초기 비용 (만원/m)		854.4	873.0	891.6	910.5	929.1
생애주기비용 (만원/m)		1061.4	1252.5	1273.2	1293.9	1314.6
연간비용 (만원/m)		66.21	64.08	61.65	61.62	62.01

5. 결 론

본 논문에서는 생애주기비용을 고려한 강박스 거더의 최적설계를 수행하기 위하여 시설안전기술공단에서 제시한 상태등급곡선과 안전진단 이력자료를 이용하여 일반적인 강계주형의 내하력곡선을 추정하였다. 추정된 내하력곡선을 이용하여 초기 내하력에 따른 교량의 공용수명을 결정하고 공용수명 동안 발생하는 총 기대비용을 실질할인율을 고려한 연간비용을 목적함수화 하여 LCC를 고려한 최적설계 및 민감도 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 내하력의 감소는 교량의 준공과 함께 진행되므로 단지 초기 단면을 최적설계 한 경우 충분한 공용수명을 확보할 수 없으며 단면 최적설계 시 반드시 교량의 공용수명을 확보하기 위한 검토가 필요하다.
- 2) 초기 내하력을 증가 시킬 경우 공용수명을 연장시킬 수 있지만 초기 내하력을 일정량 이상으로 증가시켜도 연간비용을 감소시킬 수는 없다.
- 3) 표 2에서 산출된 실질할인율 4.4%에서는 초기 내하력이 1.6~1.8사이에서 연간비용이 최소값을 갖지만 할인율에 따른 연간비용의 민감도 분석을 실시한 결과 할인율에 따라 연간비용의 최소값을 갖는 초기 내하력 값이 바뀌는 것을 알 수 있다.
- 4) 표 2에서 산출된 실질할인율 4.4%에서는 초기 내하력이 1.6~1.8사이에서 연간비용이 최소값을 가지므로 DB 24×1.7≒DB 41의 활하중에 대해 견딜 수 있도록 설계된 강박스 거더가 LCC 측면에서 가장 효율적일 것으로 판단된다.
- 5) 향후 교량의 정밀안전진단 등에 따른 체계적인 이력관리와 보수·보강 시 상태등급 향상 및 내하력의 개선 여부 등에 대한 교량 이력자료를 보완하여 보다 신뢰할 수 있는 내하력곡선을 얻을 경우 더 나은 LCC를 고려한 교량의 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단 주관의 건설핵심기술연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 연구비를 지원해 준 교량설계핵심기술연구단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

고현무, 김용길, 김동석, 함대기(2001) 지진으로 인한 손상평가를 통한 교량구조물의 생애주기비용 최소화, 대한토목학회학술발표회 논문집, pp.1~4.

시설안전기술공단(2000) 도로교의 공용수명 연장방안 연구, BR-2000-R1-37.

안장원, 김용수, 권석현(2001) 도로포장형식에 따른 LCC 분석 및 비교에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 21(5), pp.673~681.

조효남, 민대홍, 권우성, 정기영(2001) 강상자형교의 생애주기비용 최적설계, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 14(2), pp.128~136.

한국건설기술연구원(1999) '98 교량관리체계(BMS) 개선에 관한 연구.

한국도로교통협회(2005) 도로교설계기준.

Andre K.P., Sandborn J.B.(2004) Minimization of Life Cycle Costs Through Optimization of the Validation Program, Proceedings Reliability and Maintai nability Symposium.

Bojidar Yanev(2000) Maturing Management for Aging Bridges, New York City, Structural Engineering For Meeting Urban Transportat-ion Challenges.

David G.W.(1997) Life Cycle Costing-Theory, Information Acquisition and Application, *International Journal of Project Management*, 15(6), pp. 335~344.

Hugh Hawk(2003) Bridge Life-Cycle Cost Analysis , NCHRP REPORT 483, Transportation Research Board.

Raphael T.Hafta, Zafer Gürdal(1992) Elements of Structural Optimization, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.

Sarma K.C., Adeli H.(2002) Life-Cycle Cost Optimization of Steel Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.