

# LCC를 고려한 교량의 경제성 분석

## Economics analysis for life cycle cost design of bridges

신영석\* · 박장호\* · 안성찬\*\*\*

Shin, Yung-Seok · Pack, Jang-Ho · Ahn, Sung-Chan

### 요 약

합리적인 교량 대안선정을 위해서는 설계 시 경제성, 경관성, 안전성 및 기능성, 유지관리 용이성, 시공성 등 다양한 속성을 고려하여야 한다. 이 중 경제성은 초기비용뿐만 아니라 공용수명에 걸쳐 발생하는 유지관리비용, 보수·보강비용, 해체·폐기비용 등의 합인 총 생애주기비용에 대해 최소의 비용으로 최상의 가치를 창출하도록 하여야 한다.

본 연구에서는 건설계획과정에서 대표적으로 고려될 수 있는 대안으로 세 가지 교량 형식(강상자형교, 소수주형교, PSC-I형 거더교)을 대상구조물로 선정하고 교량의 공용수명은 상태등급곡선으로부터 추정된 내하율 곡선을 사용하여 산정하였다. LCC최적설계를 위해 설계변수, 제약조건, 목적함수를 구성하였고, 총 생애주기비용을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용을 사용하여 하여 합리적인 교량의 경제성 분석을 수행하였다.

**keywords** : 강상자형교, 소수주형교, PSC-I형 거더교, LCC최적설계, 생애주기비용

### 1. 서 론

공공건설사업의 효율성을 제고하기 위한 대안의 하나로 건설교통부는 “건설기술관리법시행령”을 개정하여 공공사업수행 절차와 기준을 법제화 하였으며 이후, 시행령 38조 13의 규정에 의한 “설계의 경제성 등 검토”실시를 의무화 하는 시행지침을 작성하여 규정하고 있다. 최근에는 가치공학 적용대상 규모를 500억에서 100억 공사로 확대 적용하도록 개정하여 VE제도가 전반적으로 일반화 되고 있다.

합리적인 교량 대안선정을 위해서는 설계 시 경제성, 경관성, 안전성 및 기능성, 유지관리 용이성, 시공성 등 다양한 속성을 고려하여야 한다. 이 중 경제성은 초기비용뿐만 아니라 공용수명에 걸쳐 발생하는 유지관리비용, 보수·보강비용, 해체·폐기비용 등의 합인 총 생애주기비용에 대해 최소의 비용으로 최상의 가치를 창출하는 최적설계 방법을 통해 산정하여 교량대안에 대한 비용 평가를 수행하여야 한다. 교량대안의 성능 중 정량적으로 산출이 가능한 평가기준에 대해서는 객관적인 평가기법에 의한 교량대안의 성능평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 건설계획과정에서 대표적으로 고려될 수 있는 대안으로 세 가지 교량 형식(강상자형교, 소수주형교, PSC-I형 거더교)을 대상구조물로 선정하고 각 대안에 대한 생애주기비용 최적설계를 통하여 경제성을 분석하였다.

\* 신영석 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 ysshin@ajou.ac.kr

\* 박장호 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 jangho@ajou.ac.kr

\*\*\* 안성찬 · 아주대학교 건설시스템공학과 석사과정 since0831@hotmail.com

## 2. 생애주기비용의 평가

교량 구조물을 포함한 모든 건설 구조물들은 기획·설계단계 및 시공단계로 구분되는 초기투자단계를 지나 운용·관리 및 해체·폐기 단계로 이어지는 일련의 과정을 거치게 되는데 이 일련의 과정을 생애주기(LC : Life Cycle)이라 한다. 일반적으로 건설 분야에서는 초기의 기획·설계단계에서 LCC를 고려하는 것이 그 이후 단계에서 고려하는 것보다 구조물의 경제적 효율성을 극대화할 수 있는 것으로 알려져 있다.

지금까지 합리적인 생애주기비용의 산정을 위해 다양한 모델이 개발되어 왔으나, 생애주기비용에는 많은 변수들이 존재할 수 있기 때문에 정확한 생애주기비용을 예측하기란 매우 어렵다. 본 논문에서는 생애주기비용을 초기비용, 손상비용, 유지관리비용, 보수·보강비용, 사용자비용, 해체·폐기비용의 합으로 구성하였다.

$$C_T = C_I + P_D \cdot C_D + C_M + n \cdot C_R + C_U + C_P \quad (1)$$

$C_T$  = 총 생애주기비용       $n \cdot C_R$  = 보수·보강비용       $C_I$  = 초기비용

$C_U$  = 사용자 비용       $P_D \cdot C_D$  = 손상비용       $C_D$  = 해체·폐기비용       $C_M$  = 유지관리비용

초기비용은 일반적으로 교량의 계획·설계에서부터 완공까지 발생하는 비용으로 계획 및 설계비용, 시공비용, 초기검증 재하시험비용, 감리비용 등으로 이루어져있다. 손상비용은 구조물의 신뢰도를 평가함에 있어서 하중 및 부재치수, 재료강도의 불확실성을 고려하기 위해 생애주기비용 목적함수 구성 시 손상확률의 개념을 도입하였다. 이때 손상확률을 산정하기 위해 본 논문에서는 신뢰성 평가방법으로 Hasofer-Lind의 개선된 일계이차모멘트법을 사용하였다. 유지관리비용은 완공된 구조물의 기능을 보전하고 시설물 이용자의 편의와 안전은 높이기 위하여 시설물을 일상적으로 점검·정비하는 유지관리는 정기점검·정밀점검, 정밀안전진단으로 나누어진다. 보수·보강비용이란 공용수명동안 교량의 손상에 따른 보수·보강에 소요되는 비용을 말한다. 보수·보강은 주기적으로 이루어지며 상태등급 및 내하율을 증가시킨다. 사용자비용은 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 제안한 모델을 적용하여 사용하였고 정기적인 유지관리 시에 발생하는 사용자비용 및 사회·경제적인 손실비용은 무시하고 보수·보강 및 교체 그리고 재건설시에 발생하는 비용만을 고려하였다. 마지막으로 해체·폐기비용은 교량을 해체·폐기하는데 소요되는 비용으로 해체에 따른 철거비용 및 폐기비용과 해체 후 재활용비용의 합으로 이루어진다.

생애주기비용을 산출하기 위해서는 공용수명의 결정이 요구되며 본 논문에서는 교량의 공용수명을 결정하기 위하여 교량부재별 내하율 곡선을 사용하였다.

## 3. 교량의 경제성 분석

본 논문에서는 교량의 경제성 분석을 수행하였다. 대상은 교폭 15.6m의 4경간 연속교(4@40)로 하였다.

### 3.1 설계변수

강상자형교의 경우 바닥판의 설계변수는 캔틸레버부와 중앙지간부의 콘크리트바닥판 두께 및 철근량으로 선정하였고 강재주형은 각 부재치수를 설계변수화 하였다.(그림 1) 소수주형교의 경우 바닥판의

설계변수는 캔틸레버부와 중앙지간부의 콘크리트 바닥판 두께, 철근량 및 PS강선량으로 선정하였고 강재주형은 각 부재치수를 설계변수화 하였다.(그림 2) PSC-I형교의 경우 바닥판의 설계변수는 캔틸레버부와 중앙지간부의 콘크리트바닥판 두께 및 철근량으로 선정하였고 PSC-I 주형은 각 부재치수와 PS 강선량을 설계변수화 하였다.(그림 3) T형 교각의 경는 코핑부의 설계변수는 폭, 외측높이, 내측높이 및 주철근량, 폐합스터립, 전단철근량이고 기둥부의 설계변수는 지름 및 주철근량이다.(그림 4)

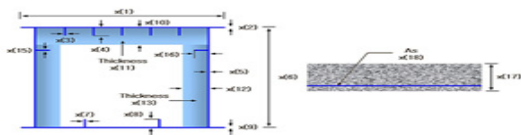


그림 1 강상자형교

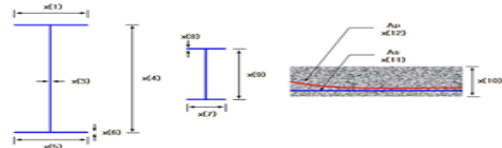


그림 2 소수주형교

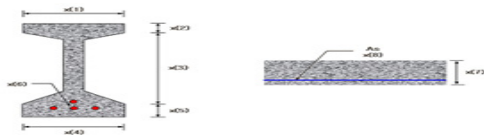


그림 3 PSC-I형교

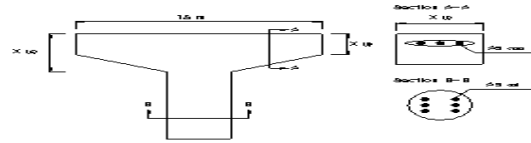


그림 4 T형 교각

### 3.2 제약조건

제약조건의 경우 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)과 콘크리트 구조설계기준(한국콘크리트학회, 2003)등의 규정을 적용하였다. 이때 콘크리트 바닥판의 경우 강도설계법, 강재주형의 경우 허용응력 설계법, PSC-I형의 경우 하중단계에서의 강도설계법과 사용 상태에서의 허용응력설계법에 의거하여 제약조건을 구성하였다.

### 3.3 목적함수

최적화를 위한 목적함수는 보다 합리적으로 경제성을 평가하기 위해 총 생애주기비용을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용으로 하였다.

$$C_r = C_T / SL \tag{1}$$

$C_r$  = 연간생애주기비용     $SL$  = 공용수명

### 3.4 공용수명에 따른 생애주기비용

그림 5는 공용수명 별 교량 상부구조의 LCC 및 연간비용이며 그림 6은 공용수명에 따른 하부구조의 LCC 및 연간비용이다.

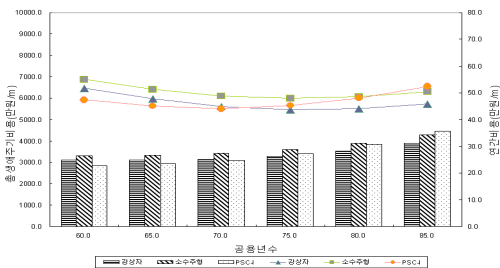


그림 5 상부구조 연간비용

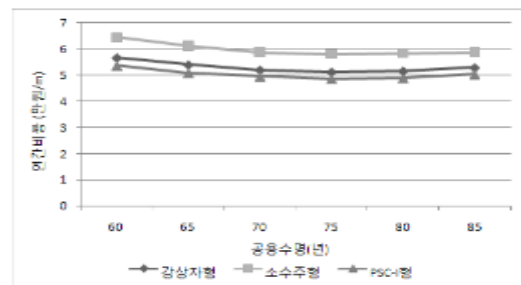


그림 6 하부구조 연간비용

총 생애주기비용은 공용수명이 증가함에 따라 더 크게 증가하는데 반하여 연간생애주기비용은 일정 공용수명까지는 감소하였다가 증가하고 있다. 따라서 공용수명의 증가에 따라 총 생애주기비용도 증가하기 때문에 교량의 경제성을 판단하기 위해서는 총 생애주기비용이 아닌 이것을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용을 사용하는 것이 합리적일 것이다. 그래프를 보면 PSC-I형 거더교의 경우 목표 공용년수가 비교적 짧은 70년에서 경제적으로 우수하며 강상자형교의 경우 그 이후의 공용년수를 가질 경우가 경제적으로 유리한 것으로 판단된다. 공용수명이 늘어날수록 PSC-I형 거더교의 경우 소요 내하율이 강상자형교나 소수주형교에 비해 급속히 상승하게 되어 단면이 커지고 이에 따라 초기비용, 유지관리비용, 해체·폐기 비용의 증가량이 다른 강재교량에 비해 급속히 커져 LCC의 상승을 유발하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 건설계획과정에서 많이 사용되고 있는 세 가지 교량 형식을 대상구조물로 선정하여 각 대안에 대한 생애주기비용 최적설계를 통하여 경제성을 분석하였다.

1. 초기비용만을 이용한 교량의 최적설계의 경우 충분한 내하율이 확보되지 않아서 시간이 경과함에 따라 안전성에 영향을 미치고 보수·보강에 따른 사용자비용이 증가하게 된다. 따라서 초기비용만을 고려한 교량의 최적설계는 경제적인 교량설계로서는 적합하지 못할 것이다.
2. 공용수명의 증가에 따라 총 생애주기비용도 증가하기 때문에 교량의 경제성을 판단하기 위해서는 총 생애주기비용이 아닌 총 생애주기비용을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용을 사용하는 것이 합리적일 것이다.
3. 공용수명의 산정을 위한 내하율곡선의 지속적인 보완 및 비용산출을 위한 보다 합리적인 방법으로 부터 LCC를 고려한 교량의 최적설계의 신뢰성을 개선 할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- Berthelot, C.F., Sparks, G.A., Blomme, T., Kajner, L. & Nickeson, M. 1996. Mechanistic probabilistic vehicle operating cost model. *J. Transportation Engineering, ASCE* 122(5): 337-341.
- Bojidar, S.Y. 2000. Maturing management for aging bridges, New York City. Structural Engineering for meeting urban transportation challenges.
- Hugh, H. 2003. *NCHRP REPORT 483-Bridge Life-Cycle Cost Analysis*. Transportation Research Board of the National Academies.
- Kayser, J. R. & Nowak, A. S. 1989. Capacity loss due to corrosion in steel girder bridges. *J. Structural Engineering, ASCE* 115: 992-1006.
- Shin, Y.S., Park, J.H., Lee, H.S., & Ahn, Y.J. 2005. Optimal life-cycle cost design of steel box girder, *J. Computational Structural Engineering Institute of Korea* 18 : 445-452.
- Shin, Y.S., Park, J.H., & Kim, T.H., 2008. Optimum life-cycle-cost design for bridge structures considering damage probability. *Proc. International Association for Bridge Maintenance and Safety*.