

# 생애주기비용을 고려한 PSC-I형 교량의 최적설계

박장호<sup>†</sup> · 신영석

아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부  
(2009. 7. 6. 접수 / 2009. 10. 15. 채택)

## Optimal Design of PSC-I Girder Bridge Considering Life Cycle Cost

Jang Ho Park<sup>†</sup> · Yung Seok Shin

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University  
(Received July 6, 2009 / Accepted October 15, 2009)

**Abstract :** This paper presents the procedure for the optimal design of a PSC-I girder bridge considering life cycle cost (LCC). The load carrying capacity curves for the concrete deck, PSC-I girder and  $\pi$ -type pier were derived and used for the estimate of service lives. Total life cycle cost for the service life was calculated as sum of initial cost, damage cost, maintenance cost, repair and rehabilitation cost, user cost, and disposal cost. The advanced First Order Second Moment method was used to estimate the damage cost. The optimization method was applied to the design of PSC-I girder bridge. The objective function was set to the annual cost, which is defined by dividing the total life cycle cost by the service life, and constraints were formulated on the basis of Korean Standards. The optimal design was performed for various service lives and the effects of design factors were investigated.

**Key Words :** optimization, PSC-I girder bridge, life cycle cost, load carrying capacity curve, damage cost, user cost

### 1. 서론

최근 들어 교량 및 도로 등과 같은 대형구조물의 설계와 건설의 효율적 시행을 위하여 기획 및 설계 단계에서부터 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 분석의 적용을 제도적인 규제로 권장하고 있다. 이와 같이 생애주기비용 분석을 위한 기본적인 제도적 근거는 마련된 상태이나 생애주기비용 분석에 관한 실무자의 인식부족과 국내 기반의 구축이 미비하여 그동안 적용 및 평가에 있어서 어려움이 있었다.

교량 설계 시 가장 중요한 사항은 설계규정을 만족하는 구조물의 안전성과 사용성이며, 추가적으로 미관 및 부수적인 기능 등을 고려해야 할 것이다. 이 때 반드시 교량 구조물의 비용 측면이 고려되어야 한다. 최근에는 종래의 교량 초기비용 최적설계 문제에서 교량의 생애주기비용으로 확대한 최적설계를 위한 많은 시도가 이루어지고 있다<sup>1-3)</sup>. 교량의 경우 생애주기비용에서 초기건설비용이 큰 부분을 차지하나, 운영 및 유지관리, 보수·보강 및 사용자비용 등을 포함한 직·간접비용 역시 상당한

부분을 차지한다. 그러나 교량의 공용수명동안 발생할 수 있는 생애주기비용은 사용환경과 설계 및 시공조건에 따라 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 최적설계에 이용하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 PSC-I형 주형과  $\pi$ 형 교각으로 이루어진 4경간 연속교에 대하여 생애주기비용을 고려한 최적설계방법을 제시하였다. 이를 위하여 교량을 구성하는 주요부재인 바닥판, PSC-I형 주형 및 교각에 대한 내하율곡선을 사용하여 공용수명을 반영하였다. 교량의 내하율곡선은 시설안전기술공단의 “도로교의 공용수명 연장방안 연구”에서 제시한 상태등급곡선과 정밀안전진단이 이루어진 교량의 이력자료를 이용하여 추정하였다<sup>4,5)</sup>. 생애주기비용으로 초기비용, 손상비용, 유지관리비용, 보수·보강비용, 사용자비용, 해체·폐기비용을 고려하였다. 보수·보강 및 교체 그리고 재건설 시 발생하는 도로등급별 사용자비용에 따른 생애주기비용을 산출하였으며, 하중 및 부재치수, 재료강도에 대한 불확실성을 고려하기 위해 손상확률의 개념을 도입하였다. 4경간 PSC-I형 연속교에 대한 생애주기비용을 고려한 최적설계를 수행하고 설계시 고려해야 할 사항들을 살펴보았다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jangho@ajou.ac.kr

## 2. 내하율곡선과 생애주기비용

### 2.1. 내하율곡선

교량의 내하율은 작용하는 하중을 안전하게 지지할 수 있는 교량의 하중저항능력을 의미한다. 교량의 내하율곡선은 시설안전기술공단의 “도로교의 공용수명 연장방안 연구”에서 제시한 상태등급곡선과 정밀안전진단이 이루어진 교량의 이력자료를 이용하여 추정하였으며, Fig. 1은 콘크리트 바닥판과 PSC-I형 주형, 그리고 교각의 내하율곡선을 추정한 그래프이다<sup>4,5)</sup>.

초기의 상태등급이 우수한 교량은 공용년수가 증가하여도 내하율의 감소가 크지 않으나, 교량의 상태등급이 낮아지게 되면 공용년수가 증가함에 따라 내하율은 급격하게 감소하게 된다. 상태등급이 우수한 경우는 안전진단 기록을 이용하여 내하율곡선의 기울기를 결정하였으나, 상태등급이 낮은 경우는 일반적으로 보수·보강조치를 취하게 되므로 안전진단 기록만으로는 내하율곡선의 기울기를 결정할 수 없다. 따라서 상태등급 E인 경우 교량의 공용수명이 한계에 이른다는 상태등급곡선의 경계조건을 이용하여 내하율곡선을 추정하였다<sup>5,6)</sup>.

상태등급이 C등급으로 낮아진 경우 교량 구조부재는 보통의 손상, 결함 및 열화가 발생한 상태로 내구성 저하를 방지하기 위하여 보수가 이루어지며, 이에 의해 구조부재의 상태등급은 B등급 이상으로 향상된다. 그러나 보수의 경우 내하율의 증가효과를 기대하기 어려우므로 내하율곡선은 기울기만 B등급 상태의 기울기로 회복되고, 내하율 자체의 상승은 기대할 수 없다.

상태등급이 C등급을 지나 D등급으로 낮아진 경우에는 교량 구조부재에 손상, 결함, 열화로 인하여 내하능력에 지장을 초래할 우려가 있어 통과하중을 제한하여야 하는 단계로써 이는 시급한 보강이 필요한 상태가 된다. 이때 보강에 의해 상태등급은 B등급 이상으로 향상된다. 보강의 경우 보강방법에 따라 목표수준의 내하율까지 상향되므로 내하율곡선에서는 기울기의 개선뿐만 아니라 내하율 자체도 증가한다.

일반적으로 PSC-I형 교량의 바닥판, 주형 그리고 교각은 공용수명동안 수차례의 보수와 보강이 이루어지며, 보수·보강의 시기와 횟수에 따라 다양한 보수·보강이력을 가지게 된다. 본 논문에서는 콘크리트 바닥판의 경우 보수 2회, 보강 1회를, PSC-I형 주형의 경우 보수 2회를,  $\pi$ 형 교각의 경우

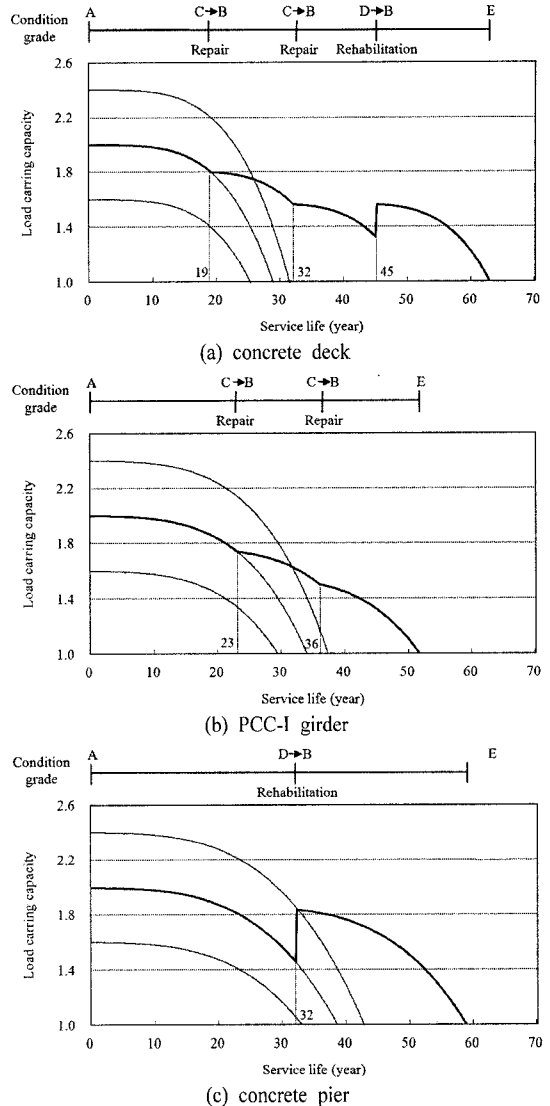


Fig. 1. Load carrying capacity curves of PSC-I bridge members.

보강 1회를 하는 것으로 하여 내하율을 추정하고 공용수명을 산정하였다(Fig. 1).

### 2.2. 생애주기비용

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.

Table 1. Initial costs for materials

구분	부재별 시공비용			
	강재 (만원/ton)	PC강선 (만원/ton)	콘크리트 (만원/m <sup>3</sup> )	철근 (만원/ton)
단위시공비용	268.8	645.0	62.6	231

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

여기서  $C_T$ 는 총생애주기비용을,  $C_I$ 는 초기비용을,  $P_d \cdot C_d$ 는 손상비용을,  $C_M$ 는 유지관리비용을,  $n \cdot C_R$ 는 보수·보강비용을,  $C_U$ 는 사용자비용을,  $C_D$ 는 해체·폐기비용을 의미한다.

### 2.2.1. 초기비용( $C_I$ )

초기비용(Initial Cost)은 일반적으로 교량의 계획·설계에서부터 완공까지 발생하는 비용으로 계획 및 설계비용, 시공비용, 초기검증 재하시험비용, 감리비용 등으로 이루어져 있다. 시공비용의 경우 종합물가정보 및 참고자료를 근거로 산출하였다. 나머지 비용에 대해서는 엔지니어링 사업대가기준 및 건설공사 감리대가기준 등을 통해 산출할 수 있으나, 본 논문에서는 초기비용의 10%로 하였다<sup>7)</sup>.

### 2.2.2. 손상비용( $P_d \cdot C_d$ )

구조물의 신뢰도를 평가함에 있어서 하중 및 부재치수, 재료강도의 불확실성을 고려하기 위해 생애주기비용 목적함수 구성 시 손상확률의 개념을 도입하였다. 이 때 손상확률을 산정하기 위해 본 논문에서는 신뢰성 평가방법으로 Hasofer-Lind의 개선된 일계이차모멘트법(Advanced First Order Second Moment, AFOSM)을 사용하였다<sup>8)</sup>. 이는 주어진 확률변수와 한계상태식을 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에 표현되도록 한 다음, 원점으로부터 한계상태식까지의 가장 가까운 직선거리를 신뢰도지수(Reliability Index)로 취하고 이를 이용하여 손상확률을 산정하는 방법이다. 또한 생애주기비용함수에 구조물의 손상비용을 고려하기 위해서 각 구조부재의 한계상태모형을 주형의 경우 휨모멘트에 의한 복부판 및 플랜지의 손상으로 정의하였고(식 (2)), 바닥판의 경우 휨모멘트에 의한 바닥판의 손상으로 정의하였다(식 (3)).

$$g_{steel} = \sigma_{allow} - \sigma_{real} \quad (2)$$

$$g_{con} = \phi \cdot M_n - (1.3M_d + 2.15M_{t+i}) \quad (3)$$

여기서  $\sigma_{allow}$ 는 강재주형의 허용응력을,  $\sigma_{real}$ 는 강재주형의 발생응력을 나타낸다.  $\phi$ 는 휨강도감소계수를,  $M_n$ 는 바닥판의 공칭휨강도를,  $M_d$ 는 바닥판의 사하중모멘트를,  $M_{t+i}$ 는 충격계수를 고려한 바닥판의 활하중모멘트를 의미한다.

손상비용  $P_d \cdot C_d$ 에서  $P_d$ 는 앞에서 서술한 손상확률을 의미하며,  $C_d$ 는 초기비용과 손상에 따른 보강을 위한 사용자비용의 합으로 정의하였다.

### 2.2.3. 유지관리비용( $C_M$ )

완공된 시설물의 기능을 보전하고 시설물 이용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 시설물을 일상적으로 점검·정비하는 유지관리는 정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단으로 나누어진다. 이때 소요되는 유지관리비용의 경우 안전점검 및 정밀안전진단 대가기준을 통해 산출할 수 있으나, 본 논문에서는 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령에 따라 초기비용의 일정한 비율로 산정하였다<sup>9)</sup>.

### 2.2.4. 보수·보강비용( $n \cdot C_R$ )

보수·보강비용이란 공용수명동안 교량의 손상에 따른 보수·보강에 소요되는 비용을 말한다. 보수·보강은 주기적으로 이루어지며 상태등급 및 내하율을 증가시킨다. 본 논문에서의 보수·보강비용은 시설안전기술공단과 한국도로공사의 시설물의 유지관리조치별 비용자료를 바탕으로 산정하였다.

보수·보강비용  $n \cdot C_R$ 에서  $n$ 은 Fig. 1에서 표시된 교량 부재들의 보수 또는 보강의 횟수를 의미하며,  $C_R$ 은 교량 부재들의 보수 또는 보강 1회에 소요되는 비용으로 정의하였다.

### 2.2.5. 사용자비용( $C_U$ )

국내에서는 공용수명동안 발생하는 사용자비용에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이므로 본 논문에서는 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 제안한 모델을 적용하여 사용자비용을 산정하였다<sup>10)</sup>. 이때 정기적인 유지관리 시에 발생하는 사용자비용 및 사회·경제적인 손실비용은 무시하고 보수·보강 및 교체 그리고 재건설 시에 발생하는 비용만을 고려하였으며, 불확실성이

Table 2. Repair and rehabilitation costs for bridge members

구분	PSC-I		바닥판		교각
	보수	보강	보수	보강	보강
적용단가 (천원/m <sup>2</sup> )	124.248	346.000	150.220	249.366	368.3

Table 3. Ratio of vehicle types

구분	고속국도		일반국도		지방도	
	교통량 (일/대)	구성비 (%)	교통량 (일/대)	구성비 (%)	교통량 (일/대)	구성비 (%)
승용차	25,912	56.2	7,610	66.5	2,994	57.0
버스	4,814	10.4	373	3.3	641	12.2
화물차	15,394	33.4	3,449	30.2	1,616	30.8

크고 산정하기 어려운 사고자비용을 제외한 시간 지연비용과 차량운행비용으로 사용자비용을 산정하였다.

$$C_U = C_{VOC} + C_{TDC} \quad (4)$$

$$C_{VOC} = \left( \frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times r \quad (5)$$

$$C_{TDC} = \left( \frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times w \quad (6)$$

여기서 차량운행비용  $C_{VOC}$ 는 공사로 인한 차량의 운행이 지연됨으로써 발생하는 비용이고, 시간지연비용  $C_{TDC}$ 는 공사로 인한 차량운행 지연에 따른 재차인원의 시간에 대해 발생하는 비용이다.  $r$ 은 평균 차량운행비용으로 6,028원/hr·대로 계산되었고,  $w$ 는 차량 한 대당 재차인원의 시간당 가치를 계산한 것으로 17,159원/hr·대로 계산되었다. 그리고  $L$ 은 공사로 인하여 영향을 받는 도로의 길이를,  $S_a$ 는 공사기간 동안의 교통속도를,  $S_n$ 는 정상상태의 교통속도를,  $ADT$ 는 평균일일교통량을,  $N$ 는 공사기간을 의미한다. Table 3은 도로등급별 차종 구성비율로 2005년 건설교통부 도로교통량 조사를 참고한 것이다.

### 2.2.6. 해체·폐기비용( $C_p$ )

교량을 해체·폐기하는데 소요되는 비용으로 해체에 따른 철거비용 및 폐기비용과 해체 후 재활용비용의 합으로 이루어진다. 한편, 교량의 구성요소별, 재료별 특성으로 인해 해체·폐기비용에 차이가 있으나, 본 논문에서는 중앙대학교 건설산업기술연구소에서 제시한 자료를 근거로 하여 초기비용에 대한 일정한 비율로 산정하였다<sup>11)</sup>.

## 3. PSC-I형교의 최적설계 정식화

본 논문에서는 PSC-I형 교량에 대하여 생애주기를 고려한 최적설계방법을 제시한다. 교량의 바닥

판은 콘크리트이며, 주형은 PSC-I형이고, 교각은  $\pi$ 형 교각으로 되어있다.

### 3.1. 설계 변수

바닥판과 주형으로 이루어진 교량의 상부구조에서 바닥판의 설계변수는 바닥판의 두께와 철근량으로 선정하였고, PSC-I 주형의 설계변수는 각 부재의 치수와 PS 강재량으로 하였다(Fig. 2, 3). 기둥과 코핑부로 이루어진 하부구조에서는 설계변수를 기둥과 코핑부에서의 치수 및 철근량으로 하였다(Fig. 4).

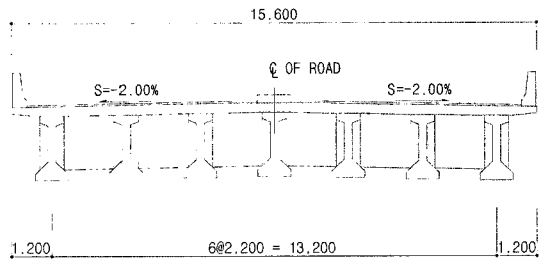


Fig. 2. Configuration of PSC-I bridge superstructure.

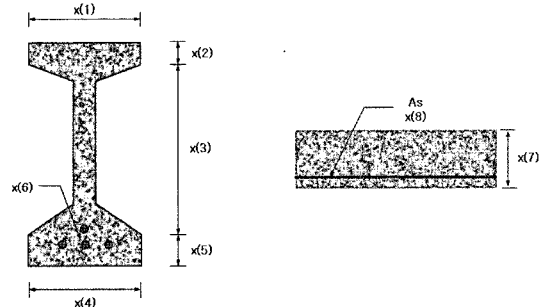


Fig. 3. Design variables of PSC-I girder and concrete deck.

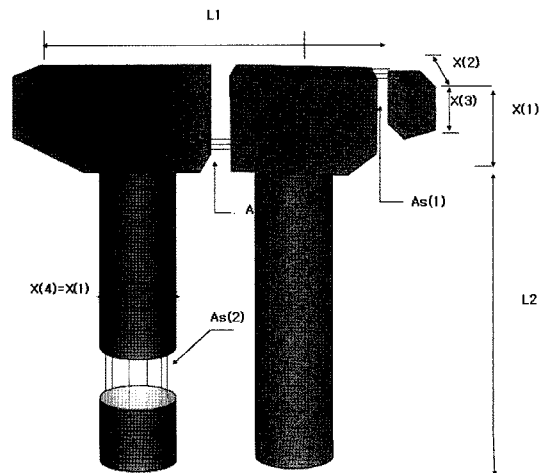


Fig. 4. Design variables of concrete pier.

3.2. 제약조건

최적설계를 위한 제약조건으로 도로교설계기준과 콘크리트 구조설계기준 등의 규정을 적용하였다<sup>12,13)</sup>. 바닥판, 주형, 교각에 대한 제약조건을 각각 Table 4~6에 정리하였다.

3.3. 목적함수

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

$$C_T = C_r / SL \tag{7}$$

여기서는  $C_r$ 는 연간생애주기비용을,  $SL$ 은 공용수명을 의미한다.

4. 생애주기비용을 고려한 PSC-I형 교량의 최적설계

본 논문에서 제시한 생애주기비용을 고려한 최적설계방법을 이용하여 PSC-I형 주형과  $\pi$ 형 교각

Table 4. Constraints for a concrete deck

제약조건	기호설명	
바닥판 두께	$g(1) = \frac{30L + 130}{h} - 1 \leq 0$ $g(2) = \frac{220}{h} - 1 \leq 0$	$L$ : 바닥판 지간(m) $h$ : 바닥판 두께(mm)
철근비	$g(3) = \frac{\rho_{min}}{\rho} - 1 \leq 0$ $g(4) = \frac{\rho}{\rho_{max}} - 1 \leq 0$	$\rho$ : 철근비
강도	$g(5) = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \leq 0$	$M_u$ : 극한 모멘트 $M_n$ : 공칭 모멘트
철근 허용응력	$g(6) = \frac{f_s \max}{0.6 \cdot f_y} - 1 \leq 0$	$f_{smax}$ : 철근 최대응력 $f_y$ : 철근 항복응력
균열폭	$g(7) = \frac{\omega}{\omega_a} - 1 \leq 0$	$\omega$ : 균열폭 $\omega_a$ : 허용 균열폭
내하율	$g(8) = \frac{\phi M_n - 1.3 \cdot M_d}{2.15 \cdot M_l(1+i) \times \text{초기내하율}} - 1 \leq 0$	$M_d$ : 사하중 모멘트 $M_l$ : 활하중 모멘트

Table 5. Constraints for a PSC-I girder

제약조건	기호설명	
프리스트레스 도입직후 콘크리트 응력	$g(1) \sim g(4) = \frac{f_c}{f_{ca}} - 1 \leq 0$	$f_s$ : 콘크리트 휨응력 $f_{ca}$ : 콘크리트 허용 휨응력
설계하중하의 콘크리트 응력	$g(5) \sim g(8) = \frac{f_{dc}}{f_{ca}} - 1 \leq 0$	$f_{dc}$ : 콘크리트 휨응력 $f_{ca}$ : 콘크리트 허용 휨응력
설계하중하의 바닥판 응력	$g(9) = \frac{f_{sc}}{f_{ca}} - 1 \leq 0$	$f_{sc}$ : 콘크리트 휨응력 $f_{ca}$ : 콘크리트 허용 휨응력
PS 강연선의 응력	$g(10) = \frac{f_p}{0.9f_{py}} - 1 \leq 0$ $g(11) = \frac{f_{pt}}{0.7f_{pu}} - 1 \leq 0$ $g(12) = \frac{f_{pe}}{0.8f_{py}} - 1 \leq 0$	$f_p$ : PS 강연선의 초기 응력 $f_{pt}$ : 즉시손실 이후 PS 강연선의 응력 $f_{pe}$ : 유효 PS 강연선의 응력 $f_{py}$ : PS 강연선의 항복강도 $f_{pu}$ : PS 강연선의 극한강도
강도	$g(13) = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \leq 0$ $g(14) = \frac{1.2M_{cr}}{\phi M_n} - 1 \leq 0$	$\phi M_n$ : 극한저항모멘트 $M_u$ : 극한 모멘트 $M_{cr}$ : 균열모멘트
처짐	$g(15) = \frac{\delta}{\delta_a} - 1 \leq 0$	$\delta$ : 활하중에 의한 처짐 $\delta_a$ : 허용처짐
내하율	$g(16) = \frac{\phi M_n - 1.3 \cdot M_d}{2.15 \cdot M_l(1+i) \times \text{초기내하율}} - 1 \leq 0$	$M_d$ : 사하중 모멘트 $M_l$ : 활하중 모멘트

Table 6. Constraints for a pier

구분	제약조건	기호설명	
코핑부	받침연단거리	$g_1 = (20 + 0.5 \times L) - s \leq 0$	$L$ : 지간길이(m) $s$ : 받침연단거리(cm) $a$ : 전단지간(m) $d$ : 유효깊이(mm) $V_s$ : 철근이 부담하는 전단강도(ton) $V_{sm}$ : 전단 공칭강도(ton) $w_{allow}$ : 허용균열폭(mm) $w$ : $1.08 \times \beta_c \times f_s \times \sqrt{d_c A} \times 10^{-5}$ $\rho_b$ : 균형철근비 $\rho_{max}$ : 최대철근비
	최소받침길이	연속지점부일때 생략가능	
	일반보 및 코벨	$g_2 = 1 - \frac{a}{d} \leq 0$	
	deep beam	$g_3 = 5 - \frac{ln}{d} \leq 0$	
	캔탈레버부 철근량	$g_4 = V_s - V_{sm} \leq 0$ $g_5 = V_u - \phi(V_c + V_s) \leq 0$ $g_6 = A_{cmin} - A_u \leq 0$ $g_7 = w - w_{allow} \leq 0$ $g_8 = \rho_b - \rho_{max} \leq 0$ $g_9 = M_u - \phi M_n \leq 0$	
기둥부	확대모멘트	$g_{10} = \frac{kl}{r} - 22 \leq 0$	$k$ : 유효길이 계수 $l$ : 기둥의 비지지 길이 $r$ : 단면의 회전반경
	소성힌지	지진시 소성여부 판단	
	심부구속철근 및 띠철근량	$g_{11} = M_d - M_{max} \leq 0$ $g_{12} = P_d - P_{max} \leq 0$	
기초부	편심축하중	$g_{13} = e - \frac{l}{6} \leq 0$	$e$ : 편심거리 $l$ : 기초 폭 $M_r$ : 전도모멘트 $M_o$ : 저항모멘트 $H_u$ : 기초에 작용하는 수평력 $V_x$ : 기초에 작용하는 연직력 $q_{max}$ : 기초의 극한지지력 $q_{allow}$ : 기초의 허용지지력
	전도	$g_{14} = 2 - \frac{M_r}{M_o} \leq 0$	
	활동	$g_{15} = 1.5 - \frac{H_u}{V_x} \leq 0$	
	지지력	$g_{16} = q_{max} - q_{allow} \leq 0$	
	강도	$g_{17} = M_u - \phi M_o \leq 0$	

으로 이루어진 교량에 대하여 공용수명에 따른 최적설계를 수행하였다. 대상교량은 4경간 연속교로 총경간은 160m(4@30m), 교량의 폭은 15.6m, 교각의 높이는 12m를 갖는다. 교량등급은 1등급(DB-24, DL-24) 교량에 해당된다. 대상교량의 최적화는 상부구조물에서는 최대정모멘트부, 최대부모멘트부, 중앙정모멘트부, 중앙부모멘트부에 대하여 수행하였으며, 하부구조에서는 중앙교각과 양측교각에 대하여 수행하였다. 최적화는 3절에서 정의한 것과 같이 설계변수를 정의하고 목적함수 및 제약조건을 설정한 후 SQP(Sequential Quadratic Progaming)을 사용하여 바닥판, 주형, 교각의 순서로 단계별 최적화를 수행하였다.

각 부재의 공용수명에 따른 최적설계의 결과는 Table 7~9와 같다. 결과에서 알 수 있는 것과 같이 공용수명이 커질수록 부재의 초기내하율과 부재의 치수 및 철근량이 증가하고 있다. 따라서 공용수명이 길어지면 초기비용을 비롯한 대부분의 비용들이 증가하여 총생애주기비용이 증가하게 된다.

Table 7. Optimal Design Values for Concrete Deck

공용수명(년)	60	65	70	75	80	85
초기내하율	1.76	2.18	2.92	4.09	5.84	8.34
바닥판두께(cm)	22.0	22.0	22.71	26.12	30.41	35.53
철근량(cm <sup>2</sup> )	16.16	20.36	26.89	31.74	37.84	45.14

#### 4.1. 공용수명에 따른 생애주기비용

Fig. 5와 6은 공용수명에 따른 PSC-I형 교량의 총생애주기비용과 연간생애주기비용을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 총생애주기비용은 공용수명이 증가함에 따라 더 크게 증가하는데 반하여, Fig. 6에서의 연간생애주기비용은 일정 공용수명까지는 감소하였다가 증가하고 있다. 따라서 공용수명의 증가에 따라 총생애주기비용도 증가하기 때문에 교량의 경제성을 판단하기 위해서는 총생애주기비용이 아닌 총생애주기비용을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용을 사용하는 것이 합리적일 것이다. 본 논문에서 사용한 교량에서는 공용수명이 70년 인 경우 연간생애주기비용이 최소값을 가지며, 이

Table 8. Optimal design values for PSC-I girder

공용수명(년)		60	65	70	75	80	85
최대정모멘트부	초기내하율	2.810	3.620	4.740	6.280	8.300	10.910
	상부 플랜지 폭(mm)	600.0	600.0	600.000	822.69	955.81	1127.90
	상부 플랜지 두께(mm)	196.56	254.40	331.96	346.80	462.61	614.65
	하부 플랜지 폭(mm)	610.98	731.93	894.09	925.12	1167.27	1485.17
	하부 플랜지 두께(mm)	178.730	186.800	186.970	351.710	356.060	333.690
	복부판 두께(mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
최대부모멘트부	복부판 높이(mm)	1624.71	1558.80	1481.07	1301.49	1181.33	1051.66
	상부 플랜지 폭(mm)	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0
	상부 플랜지 두께(mm)	265.36	343.44	448.15	468.18	624.52	829.78
	하부 플랜지 폭(mm)	861.48	1032.02	1260.67	1304.42	1645.85	2094.09
	하부 플랜지 두께(mm)	252.01	263.39	263.62	495.91	502.05	470.50
	복부판 두께(mm)	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
	복부판 높이(mm)	2290.84	2197.91	2088.31	1835.10	1665.68	1482.84

Table 9. Optimal design values for pier

공용수명(년)		60	65	70	75	80	85
기둥부	초기내하율	2.00	2.55	3.37	4.48	5.96	7.86
	기둥 지름(m)	1.581	1.596	1.622	1.671	1.739	1.829
	철근량(cm <sup>2</sup> )	439.4	447.8	462.5	490.9	531.6	588.1
코핑부	내측높이(m)	1.222	1.335	1.391	1.466	1.701	1.974
	외측높이(m)	0.620	0.667	0.761	0.790	0.902	0.987
	주철근량(cm <sup>2</sup> )	171.7	176.1	196.0	220.0	242.0	301.3
	중앙철근량(cm <sup>2</sup> )	248.0	256.0	269.7	295.9	296.2	304.7

때가 가장 경제적인 설계라고 판단할 수 있다.

Fig. 7은 지방도에서의 공용수명에 따른 초기비용, 손상비용, 유지관리비용, 보수·보강비용, 사용자비용, 해체·폐기비용의 구성 변화를 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 초기비용과 유지관리비용, 해체·폐기비용의 경우 공용수명에 따라 비율이 증가하고 있으나, 손상비용과 보수·

보강비용, 사용자비용의 경우는 공용수명의 증가에 따라 비율이 감소하고 있다. 실제로 손상비용은 공용수명이 증가함에 따라 감소한다. 반면에 보수·보강비용과 사용자비용은 공용수명이 증가하면 증가하지만 증가량이 작아 공용수명으로 나눈 연간비용은 감소하기 때문에 전체 구성에서의 비율이 감소하여 나타난다.

#### 4.2. 사용자비용에 따른 생애주기비용

Fig. 5와 6에서 총생애주기비용과 연간생애주기비용이 도로등급에 따라 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 결과에서 보면 고속도로의 경우가 비용이 가장 크게 나타나고 있으며, 일반국도가 가장 작게 나타나고 있다. 일반적으로 일반국도의 경우가 지방도보다 사용자비용이 크게 나올 것으로 예상되지만, 일반국도보다 지방도에서 재차인원이 많은

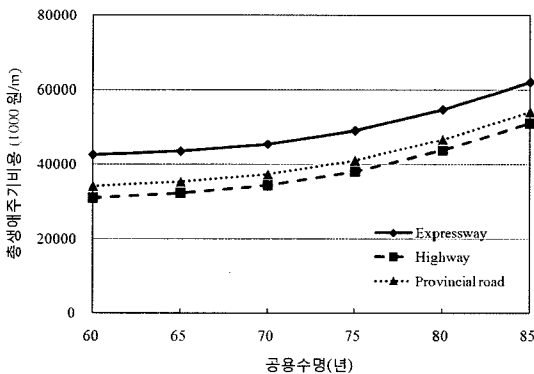


Fig. 5. Total life cycle cost with respect to the service life.

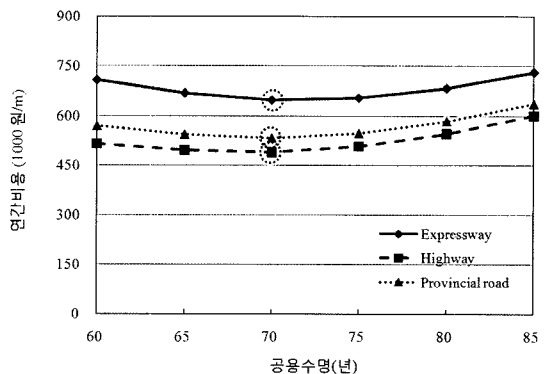


Fig. 6. Annual cost with respect to the service life in various road types.

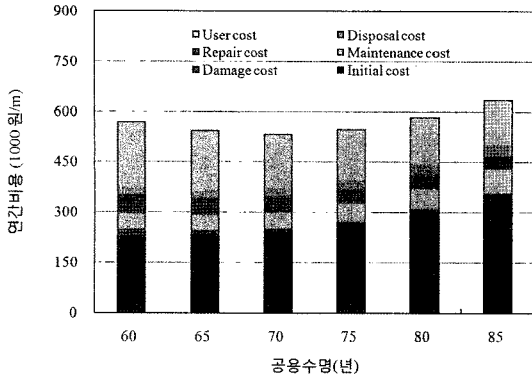


Fig. 7. Composition of annual cost with respect to the service life in provincial road.

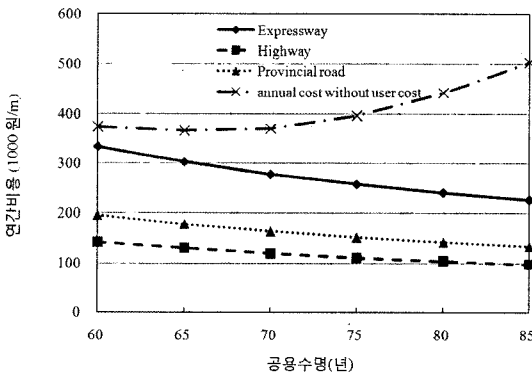


Fig. 8. Annual user cost with respect to the service life.

버스의 통행량이 많기 때문에 사용자비용이 크게 산출되었다.

Fig. 8은 공용수명에 따른 도로등급별 연간사용자비용의 변화를 나타낸 것이다. 연간사용자비용의 경우 도로의 등급에 따라 다르게 나타나지만 공용수명이 증가함에 따라 감소하고 있다. 반면에 사용자비용을 제외한 연간비용은 공용수명 65년에서 최소값을 갖는다. 따라서 사용자비용은 교량의 최적 공용수명의 결정에 영향을 미침을 알 수 있으며, 설계에 있어서 중요한 요소로 고려되어야 할 것이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 PSC-I형 주형과  $\pi$ 형 교각으로 이루어진 교량에 대하여 생애주기비용을 고려한 최적설계를 수행하였다. 내하율곡선을 사용하여 주요부재인 바닥판, PSC-I형 주형 및 교각에 대한 공용수명을 고려하였으며, 초기비용, 손상비용, 유지관리비용, 보수·보강비용, 사용자비용, 해체·폐기

비용의 합으로 생애주기비용을 구성하였다. 총경간은 160m의 4경간 PSC-I형 연속교에 대한 최적설계 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초기비용만을 고려한 교량의 최적설계는 경제적인 교량의 설계로는 적절하지 못하다. 초기비용만을 이용한 교량의 최적설계의 경우 충분한 내하율이 확보되지 않기 때문에 시간이 경과함에 따라 안전성에 영향을 받을 수 있으며, 보수·보강 및 이에 따른 사용자비용이 크게 증가하게 될 것이다.

2) 교량의 설계시에는 총생애주기비용보다는 연간생애주기비용으로 경제성을 분석하는 것이 합당할 것이다. 교량의 공용수명이 증가함에 따라 총생애주기비용도 증가하기 때문에 교량의 경제성을 판단하기 위해서는 총생애주기비용이 아닌 총생애주기비용을 공용수명으로 나눈 연간생애주기비용을 사용하는 것이 적절하다.

3) 사용자비용은 교량의 최적설계에 있어서 중요한 요소이다. 사용자비용은 실제 설계에 정확하게 반영하기는 힘들지만, 교량의 설계에 있어서 최적의 공용수명과 비용에 큰 영향을 미치기 때문에 적절하게 고려되어야 할 것이다.

4) 생애주기비용을 고려한 교량의 최적설계가 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 공용수명의 산정을 위한 내하율곡선의 지속적인 보완 및 비용 산출을 위한 보다 합리적인 방법이 요구된다.

5) 본 논문에서는 생애주기를 고려한 교량의 최적설계방법을 제시하였다. 이 방법은 경제적인 교량의 보수 및 보강의 시기의 선정에도 이용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 1) Frangopol, D.M., Lin, K.Y., and Estes, A.C., "Life-cycle cost design of deterioration structures," J. Structural Engineering, Vol. 123, pp. 1390~1401, 1997.
- 2) 고현무, 김용길, 김동석, 함대기, "지진으로 인한 손상평가를 통한 교량 구조물의 생애주기비용 최소화," 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1131~1135, 2001.
- 3) 시설안전기술공단, LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구, 2001.
- 4) 시설안전기술공단, 도로교의 공용수명 연장방안 연구, 2000.
- 5) 안예준, 이현섭, 박장호, 신영석, "바닥판과 주형



- 의 유지보수이력을 고려한 LCC 최적설계,” 전산 구조공학회 학술발표회 논문집, 제18권, 제1집, pp. 719~726, 2005.
- 6) Kayser, J.R. and Nowak, A.S., “Capacity loss due to corrosion in steel girder bridges,” J. Structural Engineering, Vol. 115, pp. 992~1006, 1989.
  - 7) De Brito, J. and Branco, F.A., “Bridge management policy using cost analysis,” Proc. Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, pp. 431~439, 1995.
  - 8) Haldar, A. and Mahadevan, S., Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons Inc., 2000.
  - 9) 건설교통부, 건설기술관리법 시행령, 대통령령 제16765호, 시행일 2000.7.1.
  - 10) Berthelot, C.F., Sparks, G.A., Blomme, T., Kajner, L., and Nickeson, M., “Mechanistic probabilistic vehicle operating cost model,” J. Transportation Engineering, Vol. 122, pp. 337~341, 1996.
  - 11) 중앙대학교 건설산업기술연구소, LCC 기법을 이용한 교량 형태별 경제성 분석 및 경제적 수명 예측에 관한 연구, 한국도로공사 연구과제, 2001.
  - 12) 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
  - 13) 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 2003.