

## 바닥판과 주형의 유지보수 이력을 고려한 LCC 최적설계

### Life Cycle Cost Optimization Considering Maintenance History of Bridge Deck and Girders

안 예 준\*  
Ahn, Ye-Jun

이 현 섭\*\*  
Lee, Hyun-Sub

신 영 석\*\*\*  
Shin, Yung-Seok

박 장 호\*\*\*\*  
Park, Jang-Ho

#### ABSTRACT

The optimal design was performed for the bridge superstructure composed of steel box girders and concrete deck considering life cycle cost. The service life of the superstructure was estimated, after load carry capacity curves for steel girder and concrete deck were derived on the basis of condition grade curves and maintenance histories. The object function was determined as life cycle cost, including initial cost, total maintenance cost, disposal cost and user cost, for a period of the estimated service life. The optimal design of the superstructure was performed for the various service lives. The annual costs were used to compare calculated results and to get the most economical design. Also this paper presents reasonable idea for the use of user cost with uncertainty.

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 배경 및 목적

교량 구조물 설계 시 엔지니어가 고려해야 할 가장 중요한 사항은 사용자가 구조물을 사용하기 위해 필요한 설계 규정을 만족하는 구조물의 안전성과 사용성이며, 추가적으로 미관 및 부수적인 기능을 만족하도록 해야 할 것이다. 다만 이러한 설계 조건들은 반드시 비용적인 면을 고려하여야 하며 최소한의 비용을 이용하여 구조 기능적인 면을 만족하기 위한 검토가 반드시 필요하다. 또한 이러한 소요 비용은 단지 구조물 시공 비용만이 아닌 공용수명 동안 발생할 수 있는 생애주기비용을 최소화 할 수 있도록 고려되어야 할 것이다. 때문에 최근 교량 구조물 설계 시 교량의 생애주기비용(Life Cycle Cost : LCC)을 고려한 합리적인 설계가 시도되고 있으며 LCC에 관한 다수의 연구가 진행되고 있다.<sup>1), 7)</sup>

최소의 비용으로 교량 구조물을 설계하기 위해서는 비용함수를 목적함수로 구성한 최적설계 기법을 적용함으로써 합리적인 설계를 도출해 낼 수 있으며, 최근에는 종래의 초기비용 최적설계 문제를 구조물의 생애주기비용 문제로 확대한 최적설계를 위한 많은 시도가 이루어지고 있다. 그러나 교량의 공용수명 동안 발생할 수 있는 생애주기비용은 사용 환경과 설계 및 시공조건에 따라 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에

\* 학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정  
\*\* 학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정  
\*\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 정교수  
\*\*\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 조교수

목적함수로 구성하기가 매우 어렵다. 때문에 이러한 비용 목적함수를 구성하기 위한 많은 연구가 발표되고 있다. 생애주기비용에 관한 목적함수는 일반적으로 확률론적인 방법과 확정적인 방법으로 구성할 수 있으며 본 연구에서는 초기 내하력에 따른 구조물의 보수·보강 이력자료를 작성한 후 공용수명을 예측하여 전생애 주기 동안 발생하는 비용을 확정적인 방법으로 구성하였다.<sup>3), 8)</sup>

## 2. 공용수명에 따른 내하력 곡선

### 2.1 상태등급 곡선

구조물의 손상정도를 나타내기 위하여 시설안전기술공단의 “시설물의 상태평가 기준 정립(교량,2000)”에서는 5등급의 상태에 대한 판정기준을 확립하였으며 “도로교의 공용수명 연장방안 연구(2000)”는 이러한 상태등급의 변화를 그림 1과 같이 제시하고 있다.<sup>10)</sup> 그림 1의 상태 등급 곡선은 경제성 분석에서의 LCP(Life Cycle Profile)를 추정하기 위하여 개발되었으며 Delphi Study와 같은 방법으로 전문가들의 의견을 수렴하여 회귀분석한 결과이다.

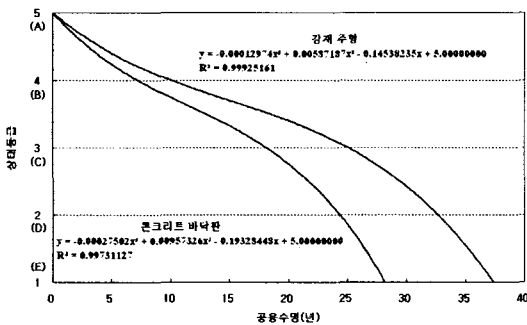


그림 1 상태등급곡선

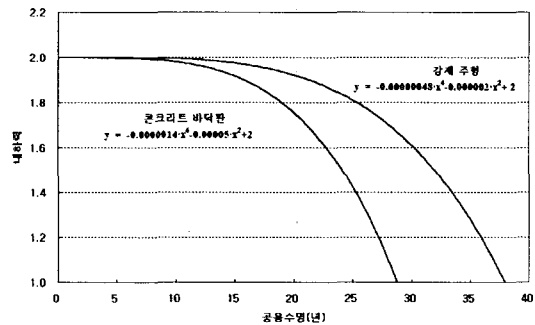
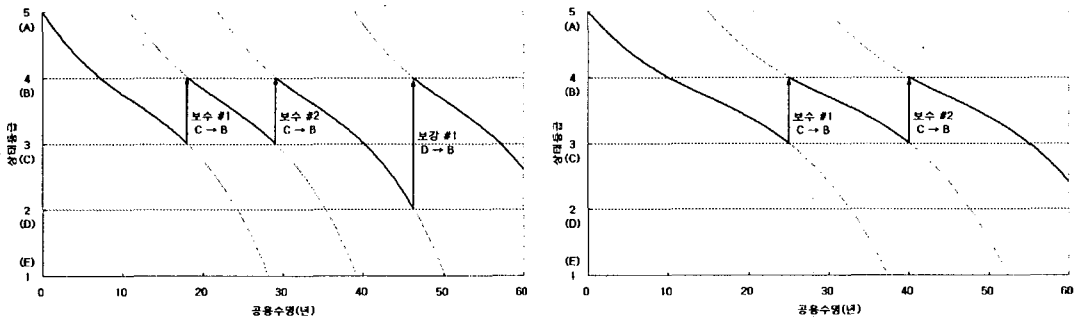


그림 2 내하력 곡선

### 2.2 내하력 곡선

본 연구에서는 그림 1의 상태등급곡선과 2회이상 정밀 안전진단이 이루어진 교량의 이력자료를 이용하여 그림 2와 같은 보수·보강이 이루어지지 않은 경우의 내하력 곡선을 제시하였다. 상태등급이 우수한 경우 교량은 내하력 감소가 진행되지 않으며 상태등급이 낮아지게 됨에 따라 내하력 곡선의 기울기가 급격하게 감소하게 된다. 상태등급이 우수한 경우는 안전진단 기록을 이용하여 기울기를 결정하였으나 상태등급이 낮은 경우는 대개 보수·보강 조치를 취하게 되므로 안전진단 기록만으로는 기울기를 결정할 수 없고 따라서 상태등급 E인 경우 교량의 공용수명이 한계에 다다른다는 경계조건을 이용하여 내하력 곡선을 구성하였다.



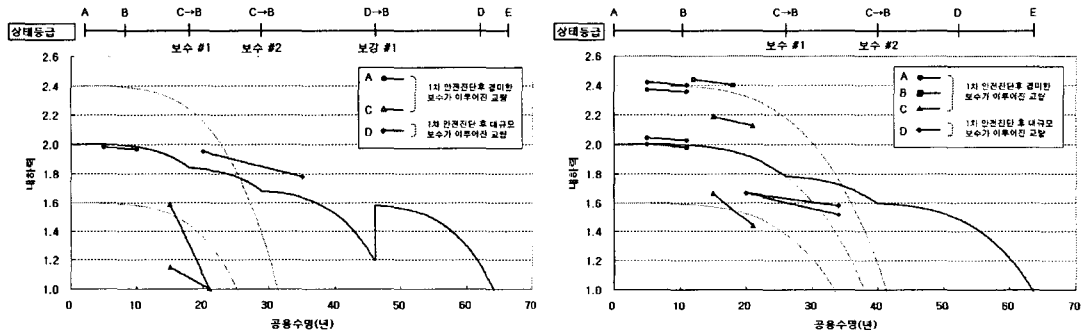
(a) 콘크리트 바닥판의 상태등급곡선

(b) 강제 주형의 상태등급곡선

그림 3 공용수명에 따른 상태등급 곡선

일반적인 교량의 경우 다음 그림 3에 보여지는 바와 같이 공용수명 기간 동안 수차례의 보수·보강이 이루어지므로 단지 교량의 이력자료만으로 내하력 곡선을 추정하는 것은 매우 어렵다. 그림 2의 내하력 곡선은 보수·보강이 전혀 이루어지지 않은 구조 부재의 내하력 곡선을 나타낸 것이므로 그림 3과 같은 보수·보강이 이루어 질 경우 상태 변화에 따른 내하력의 변화를 고려하여야 한다. 그림 3의 상태 등급 곡선은 “도로교의 공용수명 연장방안 연구(2000)”에서 제시한 곡선으로 여러 대안 중 교량의 공용수명에 비하여 합리적인 비용이 소요되는 가장 우수한 대안으로 평가받고 있는 교량 부재의 상태등급 이력(Profile) 곡선이다.

그림 4는 그림 3의 상태 변화에 따른 내하력 곡선의 변화를 나타내고 있다. 상태 등급이 C등급으로 낮아진 경우 교량 구조부재는 보통의 손상, 결함 및 열화가 발생한 상태로 내구성 저하를 방지하기 위하여 보수가 필요한 상태가 된다. 이 때 보수조치에 의하여 구조 부재의 상태등급은 B등급 이상으로 향상되며 내하력 감소를 나타내는 내하력 곡선의 기울기 역시 개선되어 B등급 상태의 기울기로 회복된다. 다만 보수조치의 경우 내하력의 증가효과를 기대하기 어려우므로 내하력의 기울기만 개선되지만 보강의 경우는 내하력 자체를 증가시킬 수 있으므로 필요수준의 내하력까지 상향조정됨을 알 수 있다.



(a) 콘크리트 바닥판의 내하력 곡선 (b) 강재 주형의 내하력 곡선  
그림 4 공용수명에 따른 내하력 곡선

콘크리트 바닥판의 경우 보수·보강 횟수에 관련하여 여러 가지 대안을 선정할 수 있지만 공용년수에 대한 비용을 산정한 결과 보수 2회+보강 1회의 경우가 가장 적절한 대안으로 판단되었으며, 강재 주형의 경우 보수 2회의 대안이 가장 적절한 것으로 판단되었다. 또한 콘크리트 바닥판의 경우 보강조치가 이루어진 후 추가적인 보수·보강조치를 통한 상태개선은 기대하기 어렵기 때문에 내하력이 증가하여도 보수 2회+보강 1회를 실시하는 것으로 가정하였으며, 강재의 경우 역시 보수 2회만을 실시하는 것으로 제한하였다.

### 3. LCC 최적설계 정식화

본 연구에서 고려한 LCC 최적설계 대상교량은 그림 5와 같은 3개의 강박스 주형과 콘크리트 바닥판으로 구성된 4경간 연속교로써 최적설계 단면은 제 1경간 최대 정 모멘트부를 대상으로 하였다. 최적설계 기법은 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 사용하였으며 최초 주형의 간격에 따라 바닥판을 최적설계한 후 주형을 최적설계하는 단계별 최적설계 방법을 사용하였다.<sup>6), 12)</sup>

#### 3.1 설계변수

바닥판의 설계변수로는 콘크리트 단면의 두께와 철근의 종류(H16~H29, 이형철근) 및 간격(100mm~200mm, 25mm간격)을 사용하였다. 강재 주형의 설계 변수는 그림 6과 같이 각 부재의 치수를 설계변수화 하였으며 복부의 간격은 230cm, 압축플랜지 종리브의 개수는 5개로 고정하였다.

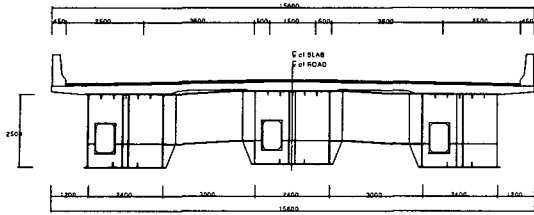


그림 5 대상교량 단면도

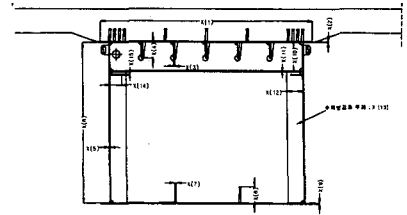


그림 6 설계 변수

### 3.2 제약조건

콘크리트 바닥판과 강재 주형의 제약조건은 표 1에 나타난 바와 같으며 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)과 콘크리트 구조 설계기준(한국콘크리트학회, 2003) 등의 규정을 적용하였다.<sup>13), 14)</sup>

표 1 콘크리트 바닥판의 제약조건

제 약 조 건		기 호 설 명	
바 다 판	바닥판 최소·최대 두께 (상한·하한 경계조건)	$g(1) = \frac{30L + 130}{h} - 1 \leq 0$ $g(2) = \frac{220}{h} - 1 \leq 0$	$L$ : 바닥판 지간(m) $h$ : 바닥판 두께(mm)
	최소·최대 철근비	$g(3) = \frac{\rho_{\min}}{\rho} - 1 \leq 0$ $g(4) = \frac{\rho}{\rho_{\max}} - 1 \leq 0$	$\rho$ : 철근비 $\rho_{\min}, \rho_{\max}$ : 최소·최대 철근비
	설계강도 $\geq$ 극한강도	$g(5) = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \leq 0$	$M_u$ : 극한 모멘트 $M_n$ : 공칭 모멘트
	철근 최대 허용응력	$g(6) = \frac{f_s \max}{0.6 \cdot f_y} - 1 \leq 0$	$f_s \max$ : 철근 최대응력 $f_y$ : 철근 항복응력
	균 열 폭	$g(7) = \frac{\omega}{\omega_a} - 1 \leq 0$	$\omega$ : 균열폭 $\omega_a$ : 허용 균열폭
	내 하 력	$g(8) = \frac{\phi M_n - 1.3 \cdot M_d}{2.15 \cdot M_i (1+i) \times \text{초기내하력}} - 1 \leq 0$	$M_d$ : 사하중 모멘트 $M_i$ : 활하중 모멘트
주 형	강재 최소·최대 두께 (상한·하한 경계조건)	$g(1) \sim g(15) = t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$	$t$ : 부재두께 $t_{\min}, t_{\max}$ : 최소·최대두께
	상·하부 플랜지 휨응력 (합성전·후+크리프+건조수축±온도)	$g(31) \sim g(42) = \frac{f_s}{f_{sa}} - 1 \leq 0$	$f_s$ : 강재 휨응력 $f_{sa}$ : 강재 허용 휨응력
	합성전+합성후 전단응력	$g(43) = \frac{v_s}{v_{sa}} - 1 \leq 0$	$v_s$ : 강재 전단응력 $v_{sa}$ : 강재 허용 전단응력
	복부판 폭/두께 비	$g(44) = \frac{t}{209 \cdot b} - 1 \leq 0$	$b$ : 복부판 폭 $t$ : 복부판 두께
	슬래브 상·하부 휨응력	$g(45) \sim g(56) = \frac{f_c}{f_{ca}} - 1 \leq 0$	$f_c$ : 콘크리트 휨응력 $f_{ca}$ : 콘크리트 허용 휨응력
	합성응력	$g(57) \sim g(58) = \left(\frac{f_s}{f_{sa}}\right)^2 + \left(\frac{v_s}{v_{sa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$	
	슬래브 압축연 항복응력	$g(59) \sim g(60) = \frac{\sum f}{0.6 f_{ck}} - 1 \leq 0$	$\sum f$ : 응력조합 $f_{ck}$ : 콘크리트 압축응력
	상·하부 플랜지 항복응력	$g(61) \sim g(64) = \frac{\sum f}{f_y} - 1 \leq 0$	$\sum f$ : 응력조합 $f_y$ : 강재 항복응력
	리브 및 보강재 단면조건	$g(65) \sim g(75)$	
	내 하 력	$g(76) = \frac{f_a - f_{\text{사하중+크리프+건조수축±온도}}}{f_i (1+i) \times \text{초기내하력}} - 1 \leq 0$	$f_a$ : 허용응력 $f_i$ : 설계 활하중에 의한 응력

### 3.3 목적함수

본 연구에서 생애주기 비용은 최초 교량의 신설부터 해체·폐기 후 재건설되어 사용되기 전까지의 시간에 해당하는 1주기의 생애주기에 대하여 고려하였다. 교량 신설 시 초기비용, 공용수명 동안 발생하는 유지관리 비용 및 보수·보강비용과 그에 따른 사용자 비용, 교량의 해체·폐기 비용 그리고 교량 재시공까지 발생하는 사용자비용등이 목적함수로 구성되었다.<sup>2)</sup>

$$\text{생애주기 비용함수} : E [C_T(X)] = C_I + E [C_M(x)] + E [C_U] + E [C_A(x)]$$

#### (1) 초기비용( $C_I$ )

초기비용이라 함은 일반적으로 교량의 계획부터 완공까지 발생하는 비용으로 계획 및 설계비용, 시공비용, 초기 검증제하시험비용, 감리비용 등으로 이루어져 있다. 시공비용의 경우 종합물가정보(2004) 및 참고문헌 자료를 근거로 산출하였고, 나머지 비용에 대해서는 엔지니어링 사업대가기준(과학기술부 공고) 및 건설공사 감리대가기준(한국건설감리협회) 등을 통해 산출할 수 있으나, 본 연구에서는 초기비용의 10%정도로 보았다.<sup>2)</sup>

표 2 초기 시공 비용

단위시공비용	강박스 거더교			비고
	주형(만원/ton)	콘크리트 바닥판(만원/m <sup>2</sup> )	철근(만원/ton)	
	268.8	62.6	231	

#### (2) 유지보수비용( $E [C_M(x)]$ ) - 관리주체가 부담하는 비용

유지관리비용이라 함은 교량의 공용수명 동안 기능을 보전하고 사용자의 편의와 안전을 높이기 위하여 정기적으로 점검 및 진단을 실시하고 교량의 손상에 따른 보수, 보강 및 교체에 소요되는 비용을 말한다. 정기적으로 실시되는 유지관리비용의 경우에는 안전점검 및 정밀안전진단 대가기준(시설물 안전진단 협회)을 통해 산출할 수 있지만, 본 연구에서는 선진국의 경우에 따라 초기비용의 30%로 가정하였고 보수, 보강비용은 시설안전기술공단(2001. 2)과 한국도로공사(2004.12) 및 건설안전관리본부(2000)의 시설물 유지보수공사 설계 지침의 자료를 바탕으로 산정하였다.<sup>9), 11)</sup>

표 3 보수 및 보강비용

보수비용 (원/m <sup>2</sup> )	철근 콘크리트 바닥판		강재 주형		
	소요일수 (day)	보강비용 (원/m <sup>2</sup> )	소요일수 (day)	보수비용 (원/m <sup>2</sup> )	소요일수 (day)
107,280	30	249,366	50	151,899	21

#### (3) 해체·폐기비용( $E [C_A(x)]$ )

해체 및 폐기비용은 교량의 기능회복을 위해 보수·보강의 방안보다 교체 및 개축하는 방안이 경제성이 있을 경우 교량 구조물을 해체·폐기하는데 소요되는 비용으로 해체에 따른 철거비용 및 폐기비용과 해체 후 재활용 비용의 합으로 이루어진다. 한편, 교량의 구성 요소별(바닥판, 주형, 교각 및 교대) 재료적 특성으로 인해 해체·폐기 비용에 차이가 있으나 본 연구에서는 기존 자료를 근거로 하여 대상 구조물인 4차선 강합성 교량인 경우에 대하여 초기비용의 39%를 적용하였다.<sup>11)</sup>

(4) 사용자 비용( $E [C_{ij}]$ )

사용자 비용은 교량의 유지보수 공사시 공사구간 조건으로 인해 정상적인 차량통행을 방해하여 교량을 통행하는 이용자가 추가적으로 지출해야 하는 비용으로 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용 등으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 NIST(National Institute of Standard and Technology, Ehlen/Marshall, 1996)에서 제안한 사용자 비용 모델을 적용하여 산정하되 정기적인 유지관리시에 발생하는 사용자 비용은 무시하고 보수·보강 및 교체 또는 재건설시에 발생하는 사용자 비용만을 고려하였고 사용자 비용 구성항목 중 시간지연비용과 차량운행비용만을 고려하여 산정하였다.<sup>4), 5)</sup>

$$C_u = C_{voc} + C_{TDC} + C_{AC}, \quad C_{voc}: \text{차량운행비용}, \quad C_{TDC}: \text{시간지연비용}, \quad C_{AC}: \text{사고비용}$$

$$C_{voc} = \left( \frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times r, \quad C_{TDC} = \left( \frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) \times ADT \times N \times \omega$$

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

여기서,  $L$ : 교량연장,  $S_a$ : 지체속도,  $S_n$ : 정상속도,  $ADT$ : 평균일일교통량,  $N$ : 공사기간,  $r$ : 차량운행비용  
 $\omega$ : 시간가치(원/hr·대),  $A_a$ : 시공중사고율,  $A_n$ : 정상사고율,  $C_a$ : 사고당비용

표 4 사용자 비용 - 한국개발연구원(2001.12), 건설교통부 통계연보(1999), 통계청(2001) 등

	승용차	소형버스	대형버스	소형트럭	대형트럭	비고
연료소모량(ℓ/km)	0.0647	0.0754	0.8857	0.1385	0.2800	충북 옥천~ 옥천 세산 4차선 도로 정상운행속도 : 80km/hr 지체속도 : 60km/hr 휘발유 가격 : 1400원/ℓ
일일교통량(대/일)	9,057	40	294	1596	49	
차종별 비율(%)	82.06	0.36	2.67	14.46	0.45	
차량운행비용(원/m)	298,598					등유가격 : 850원/ℓ
	승용차		버스		트럭	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	
재차인원(인)	0.39	1.61	3.60	18.40	1.00	
시간가치(원)	10,580	3,460	9,623	1,934	9,948	
시간지연비용(원/m)	385,557					
사용자 비용(원/m)	684,155					

4. LCC를 고려한 강합성 상부구조 최적설계

공용수명을 다양하게 변화시키며 LCC 최적설계를 수행한 결과를 다음 표 5에 나타내었다. 이때 고려된 생애 주기의 보수·보강 이력은 그림 7과 같다. 그림 7의 보수·보강 이력은 상태 등급의 변화에 따른 최적의 보수·보강 시기를 산정한 후 보수·보강 시 발생하는 사용자 비용을 최소화 하기 위하여 조치 시기를 상호 조정한 결과이다.<sup>10)</sup>

공용수명을 증가시킬 경우 초기내하력이 증가하며 이에 따라 초기비용 및 유지보수 비용이 증가하므로 공용수명 동안 발생하는 생애주기 비용은 급격

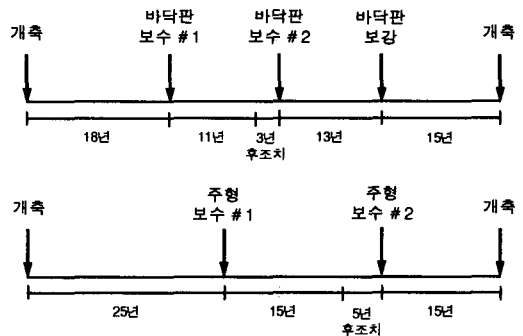


그림 7 콘크리트 바닥판과 강재주형의 상호이력

히 증가함을 알 수 있다. 그러나 생애주기 비용이 증가함에 따라 공용수명도 증가하므로 상대적인 비교를 위하여 생애주기 비용을 공용수명으로 나누어 연간비용을 산정한 후 각 설계 경우를 비교하였다. 따라서 생애주기비용은 그림 8와 같으며 약 65~70년 정도의 공용수명을 목표로 LCC 최적 설계를 수행한 결과 최소의 연간비용을 나타내고 있다.

표 5 LCC를 고려한 강박스 거더 상부구조의 최적설계

공용수명		50년	60년	65년	70년	75년	78년	
바닥판	초기내하력	1.68	1.86	2.34	3.17	4.44	5.48	
	높이(cm)	22.08	23.16	23.08	27.95	30.32	35.11	
	철근종류	D19	D19	D22	D22	D25	D25	
	철근간격	100	100	100	100	100	100	
주형	초기내하력		1.59	1.76	1.96	2.29	2.80	3.21
	상부플랜지(mm)	폭	2640	2640	2640	2640	2640	2640
		두께	11.2	11.2	11.1	11.5	11.7	11.9
	복부판(mm)	높이	2086	2118	2145	2211	2235	2302
		두께	10.0	10.1	10.3	10.6	10.7	11.0
	하부플랜지(mm)	폭	2640	2640	2640	2640	2640	2640
		두께	16.1	16.7	17.3	19.2	21.6	23.5
	생애주기비용(만원/m)		3895.5	4137.6	4319.3	4646.6	5034.0	5367.2
연간비용(만원/m)		77.91	68.96	66.45	66.38	67.12	68.81	

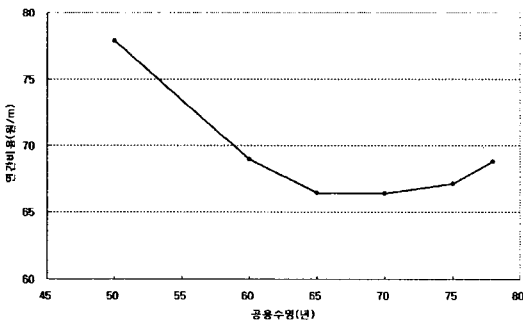


그림 8 총 생애주기비용(연간비용)

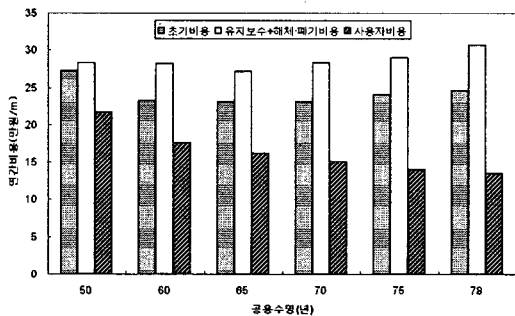


그림 9 항목별 생애주기비용(연간비용)

그림 9는 표 5에 나타난 연간 비용을 항목별로 나타낸 것이다. 공용수명을 증가시키기 위하여 초기 내하력을 증가시킬 경우 보수·보강 및 해체·폐기로 인하여 발생하는 사용자 비용은 감소하는 경향을 보이며, 초기비용 및 유지보수 비용은 감소 후 증가하는 결과를 보이고 있다.

본 연구에서 산정한 초기 비용 및 유지관리 비용의 경우 확정적인 값이지만 사용자 비용의 경우는 환경적인 요소에 의하여 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 교량의 위치에 따른 교통량, 대체도로의 유무 등 다양한 조건을 고려하여 해석대상 교량에 대한 사용자 비용을 신중하게 산정하여야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 상태등급 곡선과 정밀 안전진단 이력 자료를 이용하여 콘크리트 바닥판과 강재 주형의 내하력 곡선을 제시하였으며 바닥판과 강재 주형의 상호 이력을 고려한 내하력 곡선을 이용하여 교량의 공용

수명을 결정한 후 콘크리트 바닥판과 강박스 거더로 이루어진 교량 상부구조에 대한 LCC 최적설계를 수행하였다.

(1) 본 연구에서는 콘크리트 바닥판과 강재주형의 보수·보강 이력을 동시에 고려한 내하력 곡선을 이용하여 공용수명을 결정함으로써 기존의 교량에 대한 LCC 최적설계보다 합리적인 생애주기비용 함수 모델을 제시하였다.

(2) 교량의 초기 내하력을 증가시켜 설계하는 경우 생애주기 비용이 증가하지만 공용수명도 증가하므로 연간 비용은 감소하게 된다. 그러나 초기 내하력을 일정수준 이상으로 증가시킬 경우 공용수명은 크게 연장되지 않으므로 연간비용은 오히려 증가하게 된다. 따라서 최적의 공용수명은 환경적인 영향을 크게 받는 사용자 비용을 합리적으로 고려함으로써 결정될 수 있다.

(3) 교량의 위치에 따른 교통량, 대체도로의 유무 등 다양한 조건을 고려한 보수·보강 및 교체에 따른 사용자 비용이 공용수명 동안 발생하는 생애주기 비용에 미치는 영향을 고려할 수 있는 LCC 최적설계 모델을 제시하였다.

## 참고문헌

1. Koskito, O. J., and Ellingwood, B. R., "Reliability-Based Optimization of Plant Precast Concrete Structures", 1997, Journal of Structure Engineering, ASCE. Vol. 123. No. 3.
2. De Brito, J. and Branco, F. A., "Bridge management policy using cost analysis", Proceedings of Institution of Civil Engineers", Structures and Buildings, 104, 431-439
3. Frangopol, D. M., Lin, K. Y., "Life-Cycle Cost Design of Deterioration Structures", 1997, Journal of Structure Engineering, ASCE. Vol. 123. No.10
4. Berthelot, C. F., Sparks, G. A. Blomme, T., Kajner, L., and Nickeson, M., "Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model", 1996, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 122(5), 337-341
5. Hugh Hawk, "NCHRP REPORT 483-Bridge Life-Cycle Cost Analysis", 2003, Transportation Research Board of The National Academies
6. Rosenblueth, E. "Optimum Reliabilities and Optimum Design", 1986, Struct. Safety. 3(2). 69~83
7. 고현무, 김용길, 김동석, 함대기, "지진으로 인한 손상평가를 통한 교량 구조물의 생애주기비용 최소화", 대한토목학회 2001학술발표회 논문집, 2001, p.1131~1135
8. 조효남, 이광민, 김정호, 최영민, 봉연중, "강교의 생애주기비용 최적설계", 한국강구조공학회 논문집 제 15권 4호, 2003
9. 시설안전기술공단, "LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구", 2001
10. 시설안전기술공단, "도로교의 공용수명 연장방안 연구", 2000
11. 한국도로공사, "고속도로 교량의 생애주기비용(LCC) 분석지침(안)", 2004
12. 김용수, "MATLAB 입문과 활용", 2003
13. 한국도로교통협회, "도로교설계기준", 2005
14. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준", 2003