

LCC 최적설계를 활용한 교량 상부구조의 경제성 평가

Evaluation of Economy Feasibility for Bridge Superstructures Using LCC Optimal Design

안 예 준* · 이 광 균** · 박 장 호*** · 신 영 석****

Ahn, Ye-Jun · Lee, Kwang-Kyun · Park, Jang-Ho · Shin, Young-Seok

ABSTRACT

Life cycle cost is one of important factors in the evaluation of economy feasibility. Load carrying capacity curves for girders and decks are derived on the basis of bridge diagnostic results and condition grade curves to determine the service life and life cycle profile. The total life cycle costs including initial cost, damage cost, maintenance cost, user cost, and etc for the service life are calculated for steel box girder, PSC-I girder and rationalized plate girder. The optimal designs are performed for various service lives and different superstructure types. The effects of parameters on the life cycle cost are investigated and the economy feasibility is evaluated through the sensitivity analysis.

Keywords: Life cycle cost, optimal design, economy feasibility

1. 서 론

최근에 500억 원 이상의 공사에 적용해오던 VE(Value Engineering:가치공학)검토 제도를 100억 원 이상의 공사까지 확대 적용토록하여(국정브리핑, 2005.1) VE검토를 위하여 수행되어지는 LCC(Life Cycle Cost:생애 주기비용)의 중요도가 확산되는 추세이며 기본설계 단계에서부터 LCC의 적용이 의무화되어가고 있다. VE검토시에 필요한 인자들중 대안들의 LCC에 의한 경제성 평가는 다른 인자들에 비해 중요하나 체계적인 분석 방법이 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 3가지 형식의 교량 상부구조(강상자형교, 소수주형교, PSC-I형 거더교)에 대하여 내하력 곡선을 추정하고, LCC를 고려한 최적설계방법을 통해 교량 상부구조에 대한 경제성을 평가하였다.

2. 교량의 내하력 곡선 및 보수·보강이력

VE검토시 각 대안에 따른 경관성, 안전성, 기능성, 시공성, 경제성 등 다양한 인자들에 대한 분석이 필요

* 아주대학교 건설교통공학과 박사수료 E-mail: yehun@ajou.ac.kr

** 아주대학교 건설교통공학과 석사과정 E-mail: blueday149@hotmail.com

*** 정희원 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 E-mail: jangho@ajou.ac.kr

**** 정희원 · 아주대학교 건설시스템공학과 교수 E-mail: ysshin@ajou.ac.kr

하다. 이중 경제성은 VE검토시 매우 중요한 인자이므로, 이에 대한 보다 합리적인 판단이 필요하다. 경제성에 대한 평가는 목표 공용수명동안 발생하는 모든 비용, 즉 LCC에 대하여 분석하여 VE 검토시 대안의 가중치를 결정하게 된다. 본 연구에서는 LCC의 산정을 위해 상태등급곡선으로 부터 내하력곡선을 추정하고, 이를 사용하여 LCC비용을 산정하였다.

2.1. 공용수명에 대한 상태등급곡선 및 내하력 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 상태등급곡선으로 그림1과 같이 제시하고 있다.

상태등급이 우수한 경우 교량은 내하력 감소가 거의 진행되지 않으며 상태등급이 낮아지게 됨에 따라 내하력곡선의 기울기가 급격하게 감소하게 된다. 상태등급이 우수한 경우는 안전진단 기록을 이용하여 기울기를 결정하였으나 상태등급이 낮은 경우는 일반적으로 보수·보강조치를 취하게 되므로 안전진단 기록으로 부터 기울기를 결정할 수 없고 따라서 상태등급 E인 경우 교량의 공용수명이 한계에 이른다는 경계조건을 이용하여 내하력곡선을 그림2와 같이 추정하였다

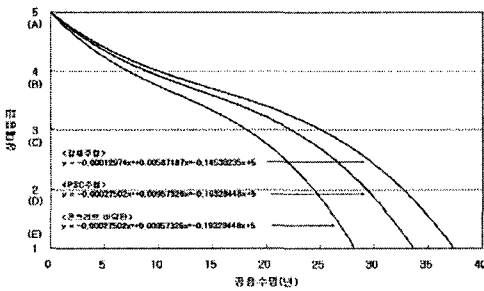


그림 1 주형·바닥판의 상태등급곡선

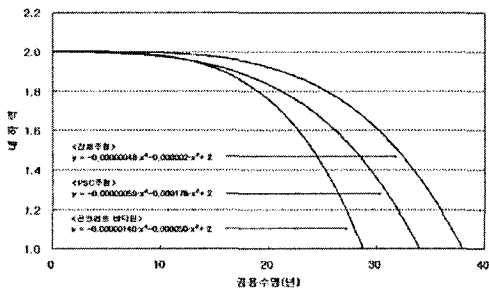


그림 2 주형·바닥판의 내하력곡선

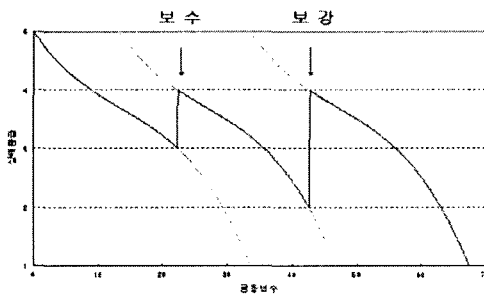


그림 3 보수·보강시 상태등급곡선 변화

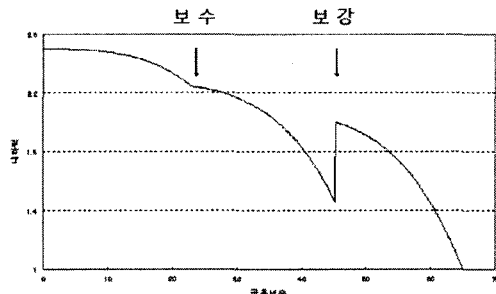
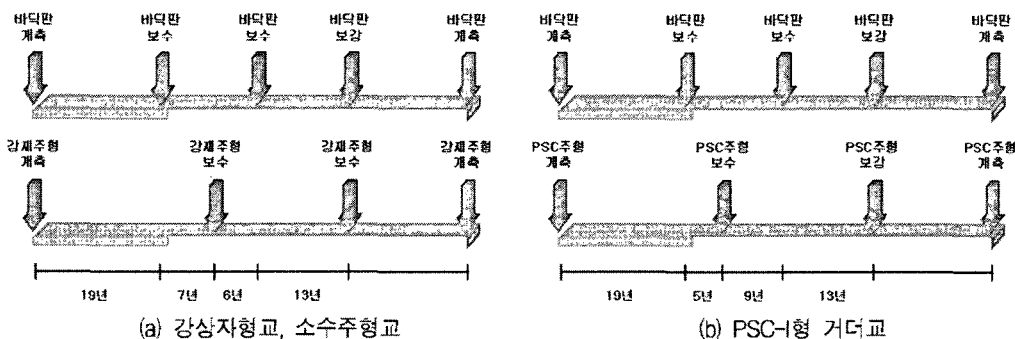


그림 4 보수·보강시 내하력곡선 변화

상태등급이 C등급으로 낮아진 경우 교량 구조부재는 보통의 손상, 결함 및 열화가 발생한 상태로 내구성 저하를 방지하기 위하여 보수가 필요한 상태가 된다. 이 때 보수조치에 의하여 구조부재의 상태등급은 B등급 이상으로 향상되며 내하력 감소를 나타내는 내하력곡선의 기울기 역시 개선되어 B등급 상태의 기울기로 회복된다. 또한 상태등급이 D등급으로 낮아진 경우 보강조치에 의하여 구조부재의 상태등급은 B등급이상으로 향상되며 내하력곡선의 경우 목표 내하력까지 상향된 후 B등급의 상태의 기울기로 회복된다.

2. 보수·보강이력

각각의 교량형식은 제한적으로 몇가지 보수·보강횟수 및 시기를 결정할 수 있다. 그러나 보수·보강에 의해 발생하는 사용자비용을 고려하는 LCC산정방법에서는 사용자비용을 최소화하기 위하여 각 형식별 최적의 보수·보강이력을 정하여야 한다.



(a) 강상자형교, 소수주형교

(b) PSC-형 거대교

그림 5 교량형식에 따른 LCP(Life Cycle Profile)

강재교량의 경우 바닥판의 두 번째 보수시기를 하부구조의 보강시기까지 연기하고, 이로 인해 수정되는 바닥판의 보강시기까지 강재주형의 두 번째 보수시기를 연기하였다. 연기기간은 5년으로 다음 상태등급인 D로 저하되는 시점이 48년보다 빠른 45년에 조치가 이루어 진다. PSC교량의 경우 바닥판의 두 번째 보수시기를 강재교량의 경우와 동일하게 연기하며 주형의 보강시기를 2년 연기하여 이와 동일하게 하여 조정하였다. 이러한 과정을 통하여 각 교량형식에 대해 사용자비용이 최소화 되는 보수·보강이력을 선정하였다. (그림5)

3. LCC를 고려한 최적설계 모델

본 연구에서는 내하력곡선과 보수·보강이력을 통하여 확정적인 방법으로 공용수명을 결정하고 초기비용, 손상비용, 유지관리비용, 유지보수비용, 해체·폐기비용, 사용자비용을 고려하여 각 교량형식의 상부구조에 대한 생애주기비용 최적설계를 수행하였다.

3.1. 설계변수 및 제약조건

설계변수는 각 최적설계단면의 부재치수 및 철근량과 PS강재량으로 선정하였으며 제약조건의 경우 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)과 콘크리트 구조설계기준(한국콘크리트학회, 2003) 등의 규정을 적용하였다. 이 때 콘크리트 바닥판의 경우 허용응력설계법, 강재주형의 경우 강도설계법, PSC의 경우 하중단계에서의 강도설계법과 사용상태에서의 허용응력설계법에 의거하여 제약조건을 구성하였다.

3.2. 최적설계 정식화

대상교량의 최적설계 단면은 최대 정모멘트부를 대상으로 하였으며 최적설계 기법은 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 사용하였다. 설계방법은 LCC를 고려하여 바닥판을 최적설계를 수행한 후 주형을 최적

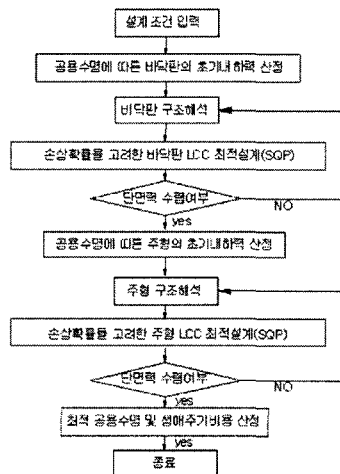


그림 6 최적설계 알고리즘

설계하는 단계별 최적설계 방법을 사용하였다. 그림6은 LCC를 고려한 최적설계 알고리즘을 보여주고 있다.

3.3. 목적함수

본 연구에서는 생애주기비용함수를 교량신설 시 발생하는 초기비용과 공용수명 동안의 유지관리 및 보수·보강비용, 재료강도의 불확실성을 고려한 손상비용 그리고 사용자비용과 교량의 해체·폐기비용으로부터 식(3)과 같이 생애주기비용 함수를 구성하였으며, 각기 다른 공용수명동안 발생하는 생애주기비용을 비교하기 위하여 식(4)와 같이 연간비용을 목적함수화 하였다.

$$\text{현재가치로 환산된 생애주기 비용함수} : C_T = C_I + P_d \cdot C_d + C_M + n \cdot C_R + C_U + C_D \quad (3)$$

여기서,	C_T	=	총 생애주기비용	$n \cdot C_R$	=	보수·보강비용
	C_I	=	초기비용	C_U	=	사용자비용
	$P_d \cdot C_d$	=	손상비용	C_D	=	해체·폐기비용
	C_M	=	유지관리비용			

$$\text{목적함수(연간비용)} : C_Y = C_T / SL \quad (4)$$

여기서,	C_Y	=	연간비용
	SL	=	공용수명 (Service Life)

3.3.1. 초기비용

초기비용은 일반적으로 교량의 계획·설계에서부터 완공까지 발생하는 비용으로 계획 및 설계비용, 시공 비용, 초기검증 재하시험비용, 감리비용 등으로 이루어져 있다. 시공비용의 경우 종합물가정보 및 참고문헌 자료를 근거로 산출하였고, 나머지 비용에 대해서는 엔지니어링 사업대가기준 및 건설공사 감리대가기준 등을 통해 산출할 수 있으나, 본 연구에서는 초기비용의 10%(De Brito & Branco, 1995) 정도로 보았다.

3.3.2. 손상비용

구조물의 신뢰도를 평가함에 있어서 하중 및 부재치수, 재료강도의 불확실성을 고려하기 위해 생애주기비용 목적함수 구성 시 손상확률의 개념을 도입하였다. 이 때 손상확률을 산정하기 위해 본 연구에서는 신뢰성 평가방법 중 Level II 방법을 사용하였으며, 그 중에서도 Hasofer-Lind의 개선된 일계이차모멘트법(Advanced First Order Second Moment, AFOSM)을 사용하였다. 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 손상확률을 고려하기 위해서 각 구조부재의 한계상태모형을 주형의 경우 휨모멘트에 의한 복부판 및 플랜지의 손상으로 정의하고 바닥판의 경우 휨모멘트에 의한 바닥판의 손상으로 정의하였으며, 각각 식 (1), 식 (2)과 같다.

$$g(\cdot) = \sigma_{allow} - \sigma_{real} \quad (1)$$

여기서, σ_{allow} = 강재주형의 허용응력 (합성전+합성후+크리프+건조수축±온도)

σ_{real} = 강재주형의 발생응력 (합성전+합성후+크리프+건조수축±온도)

$$g(\cdot) = M_D - M_U = \phi \cdot M_n - (1.3M_d + 2.15M_{I+I}) \quad (2)$$

여기서, M_D = 바닥판의 설계휨강도 M_n = 바닥판의 공칭휨강도
 M_U = 바닥판의 소요휨강도 M_d = 바닥판의 사하중모멘트
 ϕ = 휨강도감소계수 M_{I+I} = 충격계수를 고려한 바닥판의 활하중모멘트

3.3.3. 유지관리비용

유지관리비용의 경우 안전점검 및 정밀안전진단 대가기준을 통해 산출할 수 있지만, 본 연구에서는 시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령(2000)에 따라 초기비용의 일정한 비율로 고려하였다.

3.3.4. 보수·보강비용

보수·보강비용이란 공용수명동안 교량의 손상에 따른 보수, 보강에 소요되는 비용을 말한다. 보수·보강은 주기적으로 이루어지며 상태 및 내하력을 증가시킨다. 본 연구에서의 보수·보강비용은 시설안전기술공단과 한국도로공사 및 건설안전관리본부 등의 시설물 유지보수공사 설계지침의 자료를 바탕으로 산정하였다.

3.3.5. 해체·폐기비용

교량 구조물을 해체·폐기하는데 소요되는 비용으로 해체에 따른 철거비용 및 폐기비용과 해체 후 재활용 비용의 합으로 이루어진다. 한편, 교량의 구성요소별(바닥판, 주형, 교각 및 교대) 재료적 특성으로 인해 해체·폐기 비용에 차이가 있으나 본 연구에서는 중앙대학교 건설산업기술연구소(2001)에 제시된 자료를 근거로 하여 초기비용에 대한 일정한 비율로 적용하였다.

3.3.6. 사용자비용

본 연구에서는 국내 교량에 대해 공용수명동안 발생하는 사용자비용에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정 이므로 NIST(National Institute of Standard and Technology, Ehlen/ Marshall, 1996)에서 제안한 사용자비용 모델을 적용하여 산정하되 정기적인 유지관리 시에 발생하는 사용자비용 및 사회·경제적인 손실비용은 무시하고 유지보수 및 교체 그리고 재건설 시에 발생하는 불확실성이 크고 산정하기 어려운 사고자 비용을 제외한 시간지연비용과 차량운행비용만으로 사용자비용만을 산정하였다.

3.4. 할인율

LCC 산정에 있어 중요한 논점은 경제성을 평가함에 있어 시간적 등가환산을 행한다는 것이다. LCC산정을 위해서는 발생시기가 서로 다른 비용을 일정한 기준시점으로 등가환산해 주게 되는데 이 때 돈의 시간가치를 나타내는 계수인 할인율을 결정해야 한다.

$$i = \frac{1+i'}{1+j} - 1 \quad (5)$$

여기서, i = 실질할인율
 i' = 이자율
 j = 물가상승률

본 연구에서는 한국은행 경제통계시스템의 자료를 참고하여 최근 6년간의 이자율과 물가상승률을 표1과 같이 정리하였으며, 이로부터 6년간의 평균 실질할인율은 1.2%로 구하여 졌다.

표 1. 2000년~2006년 할인율 변동값

구분	2000년	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년
이자율(%)	5.16	4.69	4.12	4.00	3.65	3.33	3.84
물가상승률(%)	-0.0	-0.48	-0.77	1.41	7.55	9.87	10.90
실질할인율(%)	5.2	5.2	5.0	2.6	-3.6	-5.9	-6.4

각 교량형식별 최적설계결과는 할인율이 적용이 되지 않은 연가등액으로서 비교를 하기 위해 자본회수계수(CR)를 사용한 연가등액(A)으로 환산하여 비교하였다.

$$A = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times P \tag{6}$$

여기서, $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ = 자본회수계수(CR:Capital Recovery)

4. 교량 상부구조에 대한 경제성 평가

4.1. 설계조건의 통일화

각 교량형식의 경제성을 평가하기 위해서는 동일조건에서의 경제적 가치비교가 필요하므로 LCC최적설계시 고려된 각 대안들의 초기 조건을 통일시켜야 한다. 설계초기조건으로는 각 교량의 설계등급(1등급), 교량연장(40m), 설계차선(4차선), 사용자비용조건이 있다.

설계차선에 대한 각 교량형식의 주형 수와 주형간격은 실 설계된 4차선 교량들을 따랐다.

4.2. 경제성 평가

각 대안에 대한 할인율 12%인 경우 LCC 최적설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

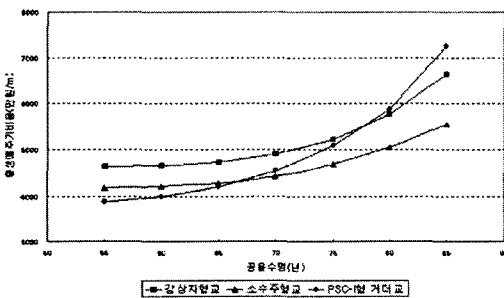


그림 7 교량 형식별 총 LCC

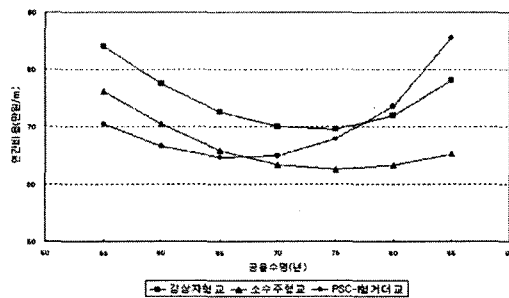


그림 8 교량 형식별 연간비용

PSC-I형 거더교의 경우 목표 공용년수가 비교적 짧은 55~65년 사이에 경제적으로 우수하며 소수주형교의 경우 그 이후의 공용년수를 가질 경우가 경제적으로 유리한 것으로 판단된다. 공용수명이 늘어날수록 PSC-I형 거더교의 경우 소수 내하력이 강상자형교나 소수주형교에 비해 급속히 상승하게 되어 단면이 커지게 되고 이에 따라 초기비용, 유지관리비용, 해체·폐기비용의 증가량이 다른 강재교량에 비해 급속히 커져 LCC의 상승을 유발하게 된다. 이러한 내하력의 급격한

상승은 그림9와 그림10에서와 같이 특히 주형의 경우 두드러지게 나타난다.

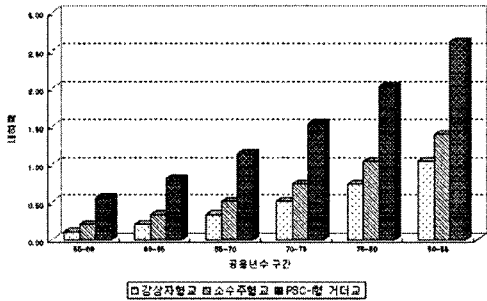


그림 9 교량 형식별 내하력 증가량(주형)

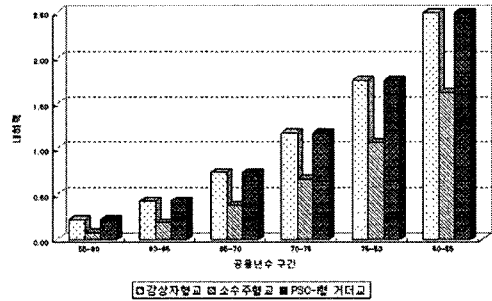
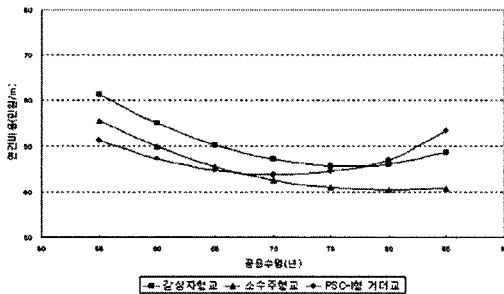


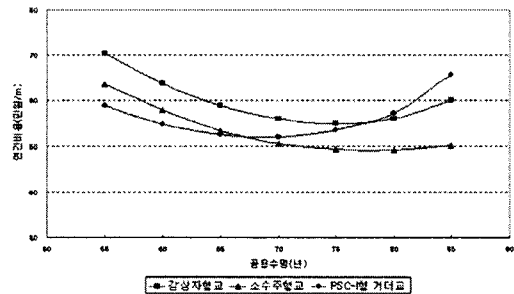
그림 10 교량 형식별 내하력 증가량(바닥판)

4.3. 할인율에 대한 민감도 분석

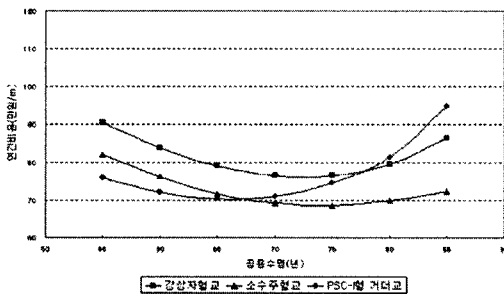
할인율은 LCC 및 투자계획에 상당히 큰 영향을 미치게 되므로 반드시 민감도 분석을 실시하여 실질할인율의 변화에 따른 LCC의 변화를 주의 깊게 살펴 볼 필요가 있다. 다음은 교량형식별 할인율을 0~1.5%까지 변화를 시키며 그에 따른 LCC를 고려한 연간비용과의 민감도를 분석한 결과이다.



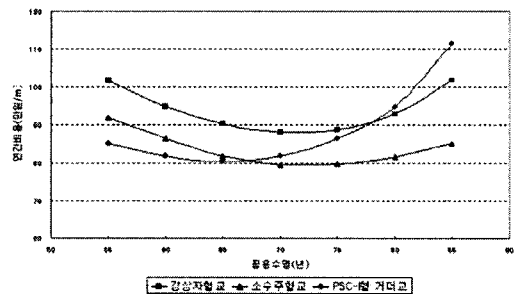
(a) 할인율 0.0%



(b) 할인율 0.5%



(c) 할인율 1.5%



(d) 할인율 2.0%

그림 11. 할인율에 따른 연간비용

할인율의 변화에 따라 각각의 교량형식의 최적의 공용수명은 감소함을 알 수 있다. 그러나 할인율에 대한 자본회수가 3가지 대안의 교량형식에 대해 동일하게 적용되므로 할인율의 변화에 대하여 VE검토에 필요한 목표

공용년수에서의 각 교량형식의 경제성의 가중치는 그림 11와 같이 동일하게 나타나고 있다. 따라서 할인율은 각 교량형식의 최적의 LCC를 나타내는 공용수명 결정에는 영향을 주지만 VE 검토시 경제성 평가에는 그 영향이 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 상대등급곡선과 정밀안전진단 이력자료를 이용하여 교량형식별 바닥판과 주형의 내하력곡선을 추정하였으며 상호이력을 고려한 내하력곡선을 이용하여 LCC 최적설계를 수행하여 이를 바탕으로 각 공용수명에 대한 경제성을 평가하였다. 특히 하중, 부재치수 및 재료강도의 불확실성을 고려하기 위해 손상 확률의 개념을 도입하였으며, 할인율에 따른 생애주기비용의 민감도분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) VE 검토시 필요한 비교 대상교량의 경제성 판단을 내하력과 보수·보강이력을 통한 LCC 최적설계를 통해 체계적으로 제시하였다.
- 2) 목표 공용수명에 대해 PSC-I형 거더교의 경우 공용수명이 55~65년, 소수주형의 경우 65년 이상의 경우 경제성이 비교 대상교량보다 우수한 것으로 나타났다.
- 3) PSC-I형 거더교의 경우 공용수명이 증가함에 따라 내하력이 급속히 증가하여 LCC 상승을 초래하여 일정 공용수명보다 큰 경우에는 경제성을 가지지 못한다.
- 4) LCC산정시에 필요한 할인율은 각 교량형식에 대한 최적의 공용수명에는 영향을 주지만 경제성 판단시 가중치 산정에 있어서는 영향을 주지 않는다.

참고문헌

1. 시설안전기술공단(2000) 도로교의 공용수명 연장방안 연구, BR-2000-R1-37
2. 조선규(2000) 프리스트레스트 콘크리트 보 단면의 최적설계, 콘크리트학회 논문집, 12(4), pp.91~101
3. 안장원(2001) AHP 기법과 LCC개념을 이용한 교량상부구조형식의 선정방법에 관한 사례연구, 대한토목학회 논문집, 21(5-D), pp.673~681
4. 고현무(2001) 지진으로 인한 손상평가를 통한 교량 구조물의 생애주기비용 최소화, 대한토목학회 학술발표회 논문집, p.1131-1135
5. 시설안전기술공단(2001) LCC개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구, TS-2001-R3-001
6. 신영석(2005) 강박스 거더의 생애주기비용 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 18(4), pp.445~452
7. 조선규(2005) 프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적설계, 한국철도학회 논문집, 8(3), pp.267~275
8. Rosenblueth, E.(1986) Optimum Reliabilities and Optimum Design, Struct. Safety. 3(2). 69~83
9. Berthelot, C. F.(1996) Mechanistic probabilistic vehicle operating cost mode, *Journal of Transportation Engineering*, pp.337-341
10. Kayser, J. R.(1989) Capacity Loss due to Corrosion in Steel Girder Bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, pp.992-1006