

철도교량의 생애주기비용분석에 관한 연구

A Study on the Life Cycle Cost Analysis of Railroad Bridges

박미연* 나옥빈** 황영민*** 김태영**** 조효남*****

Park, Mi-Yun Na, Ok-Pin Hwang, Young-Min Kim, Dae-Young Cho, Hyo-Nam

ABSTRACT

Recently, the number of bridges and tunnels in railway is increasing due to the super high-speedy of train. Also, because of successively accidents of civil structures such as bridges and dams, the importance of maintenance become influential.

The purpose of this study is to show the probabilistic life cycle cost analysis technique(PLCC) of the railroad bridge as pubic-infrastructures, and reasonably to indicate the economy in life cycle cost(LCC) through a case study. Rationally for life cycle cost analysis, the data gathered through many materials considered the uncertainty such as covariance. As a result, it is indicated that prestressed concrete bridge is pretty more cost-effective during life-cycle than preflex as well as steel box bridge. In future, if the construction of database and maintenance materials for railroad infrastructure is actualized, the life cycle cost analysis for railroad can be conducted easily and practically.

Keywords : Probabilistic, Life cycle cost, Railroad, Bridge.

1. 서론

국내 철도는 1899년 경인선 개통 이래로 100년간의 역사를 가지고 있으며, 현재 km당 국내수송량은 20%이상을 담당하고 있다. 또한, 최근 KTX의 도입으로 인하여 노선의 복선화 및 고속화를 위한 철도노반 개량공사 및 건설공사가 활발히 진행되고 있다.

이러한 철도노반시설물 중 교량이나 터널은 설계시 또는 시공시뿐만 아니라 정기점검 및 정밀진단 등의 유지관리에 시설물의 손상정도에 따라 보수보강 및 교체가 이루어지며, 이는 지속적인 비용지출로 이어진다. 이러한 예산낭비요인과 비효율성을 제거하고 건설기술의 선진화 및 합리화를 위하여 구조물의 생애주기 전반의 원가절감 측면을 고려하도록 총 공사비 500억원 이상인 공공발주공사에 대해 "설계의 경제성능 검토(설계 VE; Value Engineering)"를 시행하도록 의무화하고 있다.

그러나 현재까지도 우리나라의 건설공사에서 경제·사회적 요소 및 환경적 요인에 의한 각 시설물 형식의 장단점, 시설물의 수명동안 총비용 즉, LCC 등이 충분히 고려된 최적 시설물 형식의 선정이 이루어지지 않고 있다(정평기 등, 2004).

따라서, 본 연구에서는 철도노반 시설물중 철도교량에 대하여 LCC분석 모델을 제안하고, 이러한 모델에 기초하여 실제 대상교량에 적용하여 LCC측면에서 비용 절감효과를 검토하고자 한다.

* 유니콘스(주), 한양대 박사과정, 정회원

** 유니콘스(주), 공학박사

*** 한국철도기술공사

**** 한양대 토목·환경공학과 교수, 공학박사, 정회원

2. 철도교의 LCC 분석

2.1 LCC 분석 정의

생애주기비용은 시설물의 계획 단계에서부터 구조물의 폐기처분시까지의 모든 비용, 즉 계획-설계비, 건설비, 유지관리비, 폐기물 처분비용을 합한 것으로 구조물의 공용수명에 필요한 모든 비용을 의미한다. 또한, 건설분야에 있어서 생애주기비용분석이란 시설구조물의 건설에 있어서 하나의 대안 또는 복수의 대안에 대해서 경제적 생애주기(Economic Life Cycle)에 걸쳐서 발생하는 비용을 체계적으로 결정하기 위해서 구조물의 경제수명 범위내에서 각 대안(Alternative)의 경제성을 일정한 기준으로 정하여 등가환산한 값으로 평가하는 방법으로 정의할 수 있다.

2.2 LCC 분석 절차

일반적으로 LCC 분석은 확정적 방법과 확률적 방법으로 구분된다. 확정적 방법은 최확기대치를 가지고 LCC분석을 수행하여 하나의 결과를 얻을수 있으며, 확률적 방법은 불확실한 입력변수에 대한 분포형태나 변동계수와 같은 확률적 특성값을 사용하고, 이를 Monte Carlo Simulation 기법과 같은 확률해석기법을 이용하여 분석한다. 따라서, 확정론적 방법과 비교하면 좀더 과학적이고 합리적인 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서 철도교에 확률론적 LCC 분석방법을 사용하였으며, 분석절차는 다음과 같다.

첫째, 관련계획을 검토하고 분석관련 문헌 및 교통관련 기초자료를 수집한다.

둘째, 비교안에 대한 초기비용, 유지관리비용, 사용자비용 등에 대한 모델을 추정한다.

셋째, 비교안에 대한 요소수명, 공기, 단가등을 산정한다.

넷째, 비교안에 대한 주채별, 생주기별, 비용요소별 LCC 분석을 수행한다.

다섯째, 비교안에 대한 상대절감을 또는 중요항목별 민감도를 분석하여 선정안의 타당성을 검토한후 최적안을 제시한다.

2.3 철도교의 LCC 분석 모델

본 연구의 LCC 분석모델은 Ehlen & Marshall(1996)의 분석모델 및 비용분류 모델에 따랐다.

$$PVLC = IC + PVOMR + PVD \quad (1)$$

여기서, $PVLC$: 현재가치의 생애주기비용 IC : 초기비용

$PVOMR$: 유지관리비용 PVD : 폐기처분비용

식(1)에서 초기비용(IC) 항목은 조사비용, 설계비용 및 건설비용의 범주로 구분할 수 있으나 가장 큰 부분을 차지하는 항목은 건설비용이며, 엔지니어링사업 대가기준(파괴기술부 공고) 및 건설공사감리 대가기준(한국건설감리협회)을 바탕으로 산출한다.

유지관리비용($PVOMR$)의 항목은 구조물의 건설된 후 보수·보강 또는 재해에 의해 발생하는 비용으로써 공용중에 소요되는 비용으로서 2.4절과 같이 세분화하여 산정한다. 또한, 파괴비용(PVD)은 교량의 수명이 다한 후 해체비용과 주요 구조부재 또는 구조물의 재활용에 따른 이익 등을 고려하는 종합적인 비용이다.

2.4 유지관리비용(PVOMR)

철도교에서의 유지관리비용(PVOMR)에 대한 산정은 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$PVOMR = MC_{Ins} + MC_{Re} + MC_{De} + MC_{Bo} \quad (2)$$

여기서, MC_{Ins} : 점검, 진단비용 MC_{Re} : 보수,보강,교체비용
 MC_{De} : 시간지체비용 MC_{Bo} : 지역경제손실비용

가. 점검 및 진단비용(MC_{Ins})

점검 및 진단은 정기점검, 정밀점검 및 정밀안전진단 등으로 구분되며, 각각의 대가산출은 건교부 고시 제 2001-273호의 건설공사 안전점검 대가산정기준에 의해 산정한다.

나. 보수·보강 및 교체비용(MC_{Re})

철도교의 건설후부터 지속적으로 소요되는 비용으로서 보수·보강 및 교체비용은 LCC 비용에서 매우 중요한 부분이다. 정확한 예측을 위해서 과거의 유지보수자료 또는 산정 기준등에 근거하여 주기, 보수율, 비용에 대한 자료를 추정해야 하나 지금까지 통계적으로 축적되지 않아서 본 연구에서는 다음 표 1에 근거하여 보수·보강 및 교체 비용을 추정하였다(국토연구원, 2001; 한국개발연구원, 2001; 대한교통학회, 2003).

표 1. 철도교에 관한 보수·보강 및 교체비용 산정기준

구분	유지관리항목	비용산정기준
교량	보수·보강	건설후 10년후부터 교량 초기비용의 0.5%를 매년 적용
궤도	단선 궤도유지보수	건설후 10년후부터 매년 47.2백만원/km를 적용
	단선 궤도교체	건설후 25년마다 6.1억원/km를 적용
관리	기타유지보수	초기 건설비용의 0.72%를 매년적용

다. 시간지체비용(MC_{De})

본 연구에서는 보수·보강 및 교체시 발생하는 철도운영의 시간지체에 대한 비용을 표 2와 같이 산정하였다. 표 2는 경전선 OO구간에 대해서 2025년을 기준으로 산정하였으며, 1인당 시간가치는 전산업 월평균급여와 차종에 따른 운임비율을 통하여 산정하였다(철도청, 2000; 철도청, 2004).

표 2. 시간-차량 1대당 단위 시간자연비용 산출내역(경전선 기준, 2025년 기준)

차종	요소	①	②	③	④	②③④ (백만원/시간-원)
		교통량비율 (%)	열차종별 일일 평균횟수 T_i (대/일)	1인당 시간가치 U_i (원)	평균재차인원 N_i (인/대)	
여객	새마을	23.1	6	11,856	1,307	93
	무궁화	38.5	10	4,940	2,178	107.6
	통일	30.8	8	2,470	2,174	43
	화물	7.7	2	58	672	0.08
	합계	100	26			243.68

라. 지역경제 손실비용(MC_B)

지역경제손실비용은 철도의 운행중지나 지연등으로 인해 대상지역의 산업시설 혹은 상업시설에 미치는 간접적인 경제적 손실을 의미한다. 도로의 경우, Seskin(1990)은 간접적 지역경제 편익을 도로이용자 편익의 50~150% 정도로 제시하고 있으나, 철도에서는 이에 대한 연구가 미비하고 물류수송의 중요성을 고려하여 안전측으로 도로의 최대비용인 150%로 가정하였다.

3. LCC 분석 조건

3.1 기대공용수명

철도 시설물별의 공용수명에 대해 정리하면 다음 표 3과 같다. 따라서, 본 연구에서는 철도교 기대공용수명을 60년으로 하여 LCC 분석을 수행하였다(대한교통학회, 2003).

표 3. 철도 시설물별 수명.

구분	차 량			사 설										
	동력차		객차	노 반				궤도	건물	신호	통신	전차선	전력	기계
	디젤	전기		토공	교량	터널	정거장							
내구 연한	25	30	25	80	60	60	60	25	60	20	20	20	20	20

3.2 할인율

기간시설물 투자사업에서 할인율의 합리적인 결정은 최적투자계획에 절대적인 영향을 준다. LCC해석 결과에 상당히 민감한 요소임은 LCC평가사례에서 쉽게 찾아볼 수 있다(Ehlen 등, 1996; 조효남, 2003). 그러나 현재 우리나라의 경우 사회간접자본(SOC)투자사업의 경제적 타당성 평가에 쓰이는 할인율에 대한 명확한 기준이 없는 실정이다. 미국의 경우 실질할인율을 평균 4%이며, 대략 3~5%의 실질할인율을 적용한 예가 있다(Wall 등, 1998). 또한, 교량, 댐, 철도 등 내구연한이 상당히 긴 투자산업에 경우 할인율 수치를 낮게 적용해야 한다는 논의가 경제분야에서 아직도 진행중이다. 따라서, 본 연구에서는 표4와 같이 10여년의 금리 및 인플레이션율을 감안하여 3.63%를 적용하였다.

표 4. 적용 할인율

년 도	은행금리 (i_n) (%)	인플레이션율 (f) (%)	실질할인율 (i_r) (%)	년 도	은행금리 (i_n) (%)	인플레이션율 (f) (%)	실질할인율 (i_r) (%)
1993	8.50	4.80	3.528	2000	7.01	2.25	4.656
1994	9.30	6.20	2.920	2001	5.43	4.10	1.278
1995	8.80	4.44	4.173	2002	4.73	2.69	1.987
1996	10.79	4.98	5.533	2003	4.15	3.66	0.575
1997	11.32	4.40	6.630	2004	3.67	3.63	0.931
1998	13.30	7.54	5.357	평 균	7.83	4.12	3.63
1999	6.90	0.82	6.026	COV	0.3895	0.4296	0.5753

4. LCC 분석

4.1 분석대상

본 연구는 경전선 복선화 개발공사 ○○구간에 적용될 교량에 대해 상부구조형식을 중심으로 LCC 분석을 수행하였다. 표 5는 비교대안 PSC, PF, 강박스에 대해 각각 초기비용 및 특징에 대해 분석기초자료가 나타난 것으로, 초기비용은 원도투자편람(2001)에 제시된 비용을 모태로 산정하였으며, 경간장은 대안별 비용을 용이하게 하기 위하여 150m로 가정하였다.

표 5. 비교대안별 상부구조형식

구분	비교안 1 - PSC	비교안 2 - PF	비교안 3 - 강박스
단면			
경간장(m)	$L=25@6=150m$	$L=35@2+40@2=150m$	$L=35@2+40@2=150m$
초기비용	25.2	41.0	46.6

4.2 분석 적용 프로그램

본 연구에서는 원도교의 생애주기비용 분석을 위해 개발한 UNBLCC (ver.1.2)를 사용하여 해석을 수행하였으며, 프로그램 구성은 그림 1와 같다. 본 프로그램은 핵심적 분석과 관련된 분석은 동시에 수행할 수 있으며, 원도교의 유지관리에 관한 기본 데이터를 자체 내장하고 있어서 사용자의 활용성을 극대화 할 수 있도록 구성되어 있다. 화석적인 분석의 경우, 국내 원도구조물에 대한 유지관리 이력이 데이터베이스화 되어 있지 않은 경우에는 분석방법자체가 유지관리상의 비용적인 불확실성을 전혀 모르하지 못하기 때문에 분석이라는 자체가 무의미해 진다고 볼 수 있다. 따라서 데이터에 대한 올바른 불확실성과 자료이력의 불안정성, 그리고 구조물에 담긴 수 있는 자연 재해 및 위험요소를 고려한 화석적인 접근방법을 사용한 LCC분석이 비용분석의 핵심이 되어야 한다.

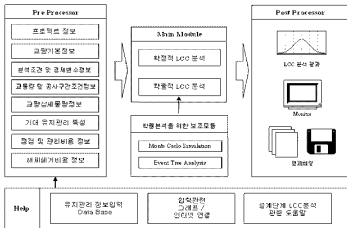


그림 1. UNBLCC의 프로그램 구성

4.2 분석결과

경계선 ○○구간에 적용될 교량형식 선정을 위해 앞장에서 제시한 기초자료 및 UNIBLCC를 가지고 확률적 LCC분석을 수행하였다. 확률적 LCC 분석을 위해 비용항목에 대한 불확실성을 확률적 분포도를 통하여 고려하였으며, 총 10000회에 대한 결과를 가지고 비용을 산정하였다. 그 결과, 표 6과 그림2에서 알 수 있듯이, 적용구간의 교량 생애기간 동안 발생하는 비용을 비교하면, PSC교가 PF교에 비해서는 약 72.2%정도, 강박스교에 비해 약 86%정도의 비용절감효과가 발생하였다.

표 6. 항목별 LCC 분석결과 (단위: 억원)

비교안	총 LCC	유지비용	유지관리비용	폐쇄폐기비용
PSC	41.6	25.2	19.3	0.1
PF	76.8	44.0	32.7	0.1
강박스	83.0	46.6	36.3	0.12



그림 2. 항목별 발생비용

그림3은 절도교의 건설년도부터 60년동안 발생하는 비용을 대안별로 비교한 것이며, 그림4는 교량형식에 따른 LCC 비용을 확률밀도함수로 나타낸 것이다. 그림 4에서 PSC교는 다른 비교안에 비해서 절대적 우위를 가지고 있으며, 발생확률비용중 평균 LCC비용은 PF교가 강박스교에 비해 약 10%정도 비용절감이 되나 비용구간별 약 50%정도 증경되는 부분이 발생됨을 알 수 있다. 따라서, 절도교 선제시 PSC교를 적용하기에 불리한 조건, 즉 교량하부에 하천이나 도로가 위치한 경우에는 대안으로서 경간길이 다소 긴 1형교 또는 강박스교를 사용할 수 있으며, 구조적 특성이나 지역-환경적인 특성을 고려하여 세용평가뿐만 아니라 가치평가를 실시한다면 좀 더 합리적인 대안분석이 가능 수 있다.

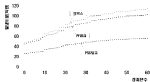


그림 3. 누적 LCC

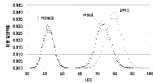


그림4. 확률밀도함수

5. 결 론

본 연구는 절도시설물중 절도교를 대상으로 확률적 LCC분석기법을 통한 가치 분석의 방법을 제시하고, 이 분석방법을 적용한 LCC 전용 프로그램(UNIBLCC)을 경계선 ○○구간에 적용하였다. 적용된 절도교 형식은 일반적으로 많이 적용하는 PSC, PF, 강박스교에 대해 수행하였다. 그 결과, PSC교의 총 LCC 비용이 대안에 비해 최대 86%의 비용절감 효과가 있음을 알 수 있었다.

차후 절도 구조물의 Network 기반의 권 시설물의 유지관리 자료 및 데이터 베이스 구축이 현실화 된다면 실제적인 절도 LCC분석의 수행이 가능해 질 수 있다.

참고문헌

1. 국토연구원 (2001), "민간투자사업의 운영관리비산정에 관한 연구".
2. 대한교통학회 (2001), "철도투자편람".
3. 대한교통학회 (2003), "철도투자분석 및 평가편람 개정".
4. 정평기, 서종원, 지승구(2004), "교량구조물의 확률적 LCC 및 VA 방법에 의한 의사결정방법론", 2004 대한토목학회 정기학술대회, pp 1856-1861.
5. 철도청 (2000), "경전선 개량 기본계획보고서".
6. 철도청 (2004), "철도통계연보".
7. 한국개발연구원 (2001), "예비타당성 조사 수행을 위한 일반지침 연구".
8. H-N, Cho, (2003), "Life Cycle Cost Effectiveness for Design and Rehabilitation of Civil Infrastructure", SEWC2003.
9. Ehlen, M. A. and Marshall, H. E. (1996), "The Economic of New Technology Material: A Case Study of FRP Bridge Decking", Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD20899.
10. Seskin, S. N. (1990), "Comprehensive framework for highway economic impact assessment methods and result", Transportation Research Record 1274, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 24~34
11. Walls, J. III, and Smith E. M. R. (1998), "Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design", Interim Technical Bulletin, FHWA, US DOT.