

# 확률적 방법에 의한 철도시설물의 LCC 분석 Probability-based Life Cycle Cost Analysis of Railroad Structures

소병춘<sup>\*</sup>    최영민<sup>\*\*</sup>    조선규<sup>\*\*\*</sup>    신경철<sup>\*\*\*\*</sup>    정재동<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Sho, Byung-Choon    Choi, Young-Min    Cho, Sun-Kyu    Shin, Kyung-Chul    Jung, Jae-Dong

## ABSTRACT

The management of railroad structures is more difficult and complicate because there are many structures such as rail, bridge, tunnel, station, and so on. Therefore, LCC(Life Cycle Cost) analysis of railroad structures as public infrastructure must contain a maintenance cost as well as an initial cost in order to make a more effective management during the life cycle on the design phase. This paper presents a cost classification scheme considering user costs such as value of delayed time of passenger and freight. Also, in this study it is developed a probabilistic life cycle cost(PLCC) analysis model of railroad structures taking into account uncertainties and variations of input variables in order to analyze LCC. It may be stated that the model proposed in this study can greatly contribute to the making optimal decision, the estimate of the maintenance cost and the allocate of budget in the project of railroad structures.

## 1. 서 론

철도시설물은 궤도, 교량, 터널, 용벽, 정거장 등 많은 시설물과 각종 설비 및 장비로 이루어져 있다. 이러한 대형 시설물의 계획, 설계, 건설과 유지관리에 투입되는 막대한 예산의 효율적 집행 및 예산낭비를 방지하기 위해서 건설교통부에서는 1999년 공공건설사업 효율화 종합대책을 발표하여 500억원 이상의 대규모 정부발주 공사에서는 LCC(생애주기비용)분석을 의무화하도록 건설기술관리법 시행령 제38조13항에 의거 규정하고 있다. LCC분석은 시설물의 초기건설비용뿐만 아니라 생애주기(계획, 설계, 건설, 운용-유지관리, 폐기) 전반에 걸쳐 발생하는 비용을 토대로 가장 경제적인 대안의 선정과 그로인한 경제적인 사업의 추진을 목표로 수행하게 된다. 특히, 오늘날에는 신기술, 신공법의 발달로 시설물의 사용년수가 증가하면서 운용중 인건비, 적접비인 에너지 비용, 간접비 등의 상승과 물류의 증가 및 사회경제적 발전 등으로 유지관리에 따른 사회간접비용의 상승으로 인한 유지관리비가 차지하는 비중이 증가함에 따라 설계단계에서 LCC분석에 기초한 최적대안의 선정은 예산절감을 위해 반드시 요구된다. 최근 도시시설물 및 해안방만시설에서는 LCC 분석 및 이에 기초한 VEB(Value Engineering)평가를 바탕으로 최적대안을 선정하고자 하는 노력이 설계단계에서 일반화되고 있으나 철도시설물에서는 이제 막 도입단계라 할 수 있다.

\*    자람기술(주) 기술개발팀 팀장

\*\*    자람기술(주) 대표이사, 서울산업대학교 토목공학과 겸임교수

\*\*\*    서울산업대학교 철도전문대학원 교수

\*\*\*\*    (재)한국철도기술공사 상무

\*\*\*\*\*    (주)다윈이엔씨 대표이사

그러나 이와 같은 LCC분석에 있어서 최근까지 이용되고 있는 확정적 분석방법은 LCC분석에서 각종 비용 산정을 위해 고려하는 변수의 불확실성을 고려하지 않는 간단한 접근방법으로 미래의 소요비용을 현시점에서 예측하는 LCC분석의 신뢰도를 확보할 수 없으므로 본 연구에서는 확률적 분석방법을 이용하여 철도시설물의 생애주기비용을 분석하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 비용 분류에서 초기비용, 유지관리비용, 해체폐기비용으로 구성하였으며, 열차지연에 따른 철도이용자의 시간가치와 화물가치를 포함하여 현재가치 기준으로 정식화하였다.

## 2. 철도시설물의 LCC분석

### 2.1 LCC분석 방법

일반적으로 LCC분석은 확정적 방법과 확률적 방법으로 구분할 수 있다. 확정적 방법은 전술한 바와 LCC분석을 위한 입력변수의 불확실성을 고려하지 않은 간단한 분석방법으로 하나의 최적기대값을 가지고 수행하므로 결과도 하나의 LCC 비용만을 얻을 수 있다. 이에 비해 확률적 방법은 LCC분석을 위해 불확실한 입력변수에 대한 확률적 특성값(분포형태, 평균값, 표준편차 또는 변동계수 등)을 입력값으로 사용하고 이를 Monte Carlo 시뮬레이션기법과 같은 확률해석기법을 이용하여 LCC분석을 수행함으로써 불확실량을 반영하는 LCC 비용을 획득할 수 있다. 이러한 확률적 방법은 비용항목의 발생가능성 뿐만 아니라 비용항목이 발생할 수 있는 전체 범위(확률분포)에서 비용을 해석하기 때문에 확정적 방법보다 합리적이며 과학적인 방법으로 FHWA(Walls III/Smith, 1998)에서 추천하고 있다. 확률적 방법의 절차는 다음과 같다.

- (1) 단계 1 : LCC분석의 목적 및 비교대안의 구상
- (2) 단계 2 : LCC분석을 위한 가정사항 및 고려하는 대안별 비용관련 데이터 입력과 입력변수의 불확실량에 대한 확률특성값(분포형태, 평균, 변동계수)의 정량화
- (3) 단계 3 : 입력된 변수를 바탕으로 시뮬레이션을 통한 LCC비용 산정
- (4) 단계 4 : LCC비용에 대한 통계적 분석 및 최종대안 결정

### 2.2 비용분류체계

철도시설물의 LCC분석을 위한 비용항목은 크게 초기건설비, 유지관리비, 해체·폐기비용으로 구성되며 비용항목별로 분류하면 그림 1과 같다.

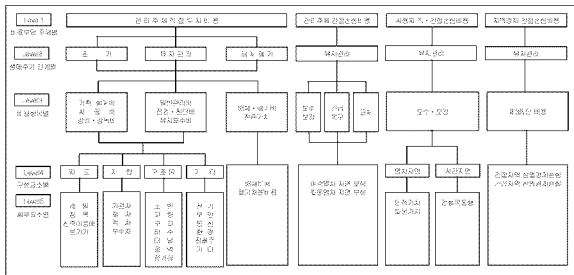


그림 1. 철도시설물 비용분류체계

### 2.3 LCC비용 산정식

생애주기비용은 기대수명(설계수명 혹은 내구연한)동안 기대되는 초기건설비용, 유지관리비용과 해체-폐기비용의 합으로 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$LCC_{Total} = C_{INI}(X, t) + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+q)^t} \{E[C_{OMR}(X, t)] + E[C_{DIS}(X, t)]\} \quad (1)$$

여기서,  $C_{INI}$  = 초기건설비용;  $C_{OMR}$ ,  $C_{DIS}$  = 시간  $t$ 와 설계변수  $X$ 의 함수로 구성된 유지관리 비용과 해체-폐기비용;  $q$  = 할인율;  $t$  = 분석기간

(1) 초기비용

$$C_{INI} = C_{PLA} + C_{DES} + C_{CON} + C_{CVS} \quad (2)$$

여기서,  $C_{PLA}$ ,  $C_{DES}$ ,  $C_{CON}$ ,  $C_{CVS}$  = 각각 계획비용, 설계비용, 건설비용 및 감리비용

(2) 유지관리비용

$$C_{OMR} = C_{OMR}^{od} + C_{OMR}^{oi} + C_{OMR}^u + C_{OMR}^d \quad (3)$$

여기서,  $C_{OMR}^{od}$  = 관리주체가 직접 부담하는 유지관리비용으로 일반관리비용, 점검·진단비용, 유지보수비용의 합계;  $C_{OMR}^{oi}$ ,  $C_{OMR}^u$ ,  $C_{OMR}^d$  = 각각 보수·보강과 긴급복구 및 구성요소 교체 등 유지관리조치에 따른 관리주체가 간접적으로 부담하는 유지관리비용, 여객 및 화물열차 사용자 부담 비용 및 지역경제손실비용을 나타냄.

(3) 해체-폐기비용

$$C_{DIS} = C_{DIS}^{od} + C_{DIS}^{oi} \quad (4)$$

여기서,  $C_{DIS}^{od}$ ,  $C_{DIS}^{oi}$  = 각각 시설물의 해체-폐기시 관리주체가 직접 또는 간접 부담하는 비용

### 3. 철도시설물의 LCC분석 관련 데이터

#### 3.1 내구연한

철도시설물의 내구연한에 대한 자료는 “철도투자편람(2003)”에 제시되어 있으며 이를 정리하여 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 철도시설물별 수명

구분	차 량		시 설											
	동력차 디젤 전기	객차	노 반		터 널		정거장	레 도	건물	신호	통신	전차선	전력	기계
내구 연한	25	30	25	80	60	60	60	25	60	20	20	20	20	20

공공시설 투자사업의 경제성 평가기간은 대체로 해당시설물의 수명과 여러 분야의 장애 변동여건에 대하여 예상되는 가능성을 검토하여 결정한다. 철도시설물의 경우에는 예비타당성 조사에서 경제성 타당성 평가단계와 재무적 타당성 평가단계에서 분석기간을 30년 혹은 25-30년으로 설정하고 있다. 그러나 철도를 구성하는 교량, 터널 등의 각종 시설물의 수명은 60년으로 규정하고 있는바, 본 연구에서는 철도시설물의 내구연한에 기초한 LCC분석 기간을 60년으로 추정하였다.

#### 3.2 할인율

유지관리시 발생시기가 서로 다른 비용이 여러 기간에 걸쳐 발생할 때, 투입 비용을 일정한 기준시점으로 환산하기 위해 적용되는 돈의 시간적 가치를 나타내는 계수를 할인율이라고 한다. 이러한 할인율은 현재가치를 계산하는 목적과 배경에 따라 그 값이나 개념이 다르다. LCC분석에 관한 기존 연구 및 보고서 자료를 살펴보면 할인율은 불가상승률과 이자율을 동시에 고려하여 인플레이션 효과가 제거된 실질할인율을 사용하고 있다. 금리자유화 이후(1993~2003년)의 은행금리와

인플레이션을 고려하여 실질할인율을 추정하여 보면 3.67%이고 변동계수는 0.5로 계산되나, 외환 위기(IMF) 등의 경제상황이 고려되어 변동성이 크게 나타난 것을 알 수 있으므로 본 연구에서는 국내-외에서 일상적으로 사용하는 변동계수 중 다소 큰 값인 0.1로 적용하였다.

### 3.3 초기비용

설계비 및 감리비는 우리나라에서 일반적으로 적용하고 있는 엔지니어링사업대가의 기준(과학기술부 공고) 및 건설공사감리대가기준(한국건설감리협회)을 바탕으로 산출하였다.

### 3.4 유지관리비용

#### (1) 점검 및 진단비용

점검 및 진단은 정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단 등으로 구분되며, 각각의 대가 산출은 건교부 고시 제2001-273호의 건설공사 안전점검 대가산정기준에 의해 산정하였다.

#### (2) 보수·보강·교체비용

##### 1) 관리주체의 직접투자비용

유지보수비용을 예측하기 위해서는 과거의 유지보수 자료 또는 산정기준 등에 의하여 산출되며 주기, 보수율, 비용에 대한 자료가 현재까지 축적되어 있지 않아 본 연구의 사례분석에서는 표 2의 자료를 이용하여 유지보수비용을 추정하였다.

표 2. 유지관리비 산정기준

구분	유지관리항목	비용 산정근거	적용근거
궤도	궤도유지보수	47.2백만원/km(다선기준)을 개통 후 10년 후부터 매년 적용	한국개발연구원(2001)
	궤도교체	12.2억원/km(복선기준)을 개통 후 25년마다 적용	한국개발연구원(2001)
터널	터널라이닝보강	터널시공비의 10%를 매 30년 마다 적용	국토연구원(2001)
	터널라이닝교체	터널시공비의 30%를 매 50년 마다 적용	국토연구원(2001)
교량	보수·보강	교량 시공비의 0.5%를 개통 후 10년 후부터 매년 적용	Mcnn(1995)
관리	기타 총괄유지관리	초기 건설비용의 0.72%를 매년 적용	국토연구원(2001)

##### 2) 관리주체의 간접손실비용

열차의 유지보수시에 열차가 지연되면 철도청 규정에 따라 인력, 물적가치를 보상하도록 되어 있다. 무궁화열차의 경우 지연시간이 50분이상 발생시 운임의 25%를 보상하도록 되어있다. 본 연구의 사례분석에서는 8년마다 1대의 열차에서 발생하는 것으로 가정한다. 이때, 인근지역의 무궁화 열차요금은 2,500원이다. 또한 화물열차의 경우 화물의 경중에 따른 피해보상은 무시한다.

#### (3) 사용자 작간점검 손실비용

##### 1) 열차지연

##### ① 열차지연에 따른 손실비용

열차의 지연으로 인해 열차를 이용하는 승객에게 발생하는 시간가치 손실비용은 다음과 같이 산출할 수 있다(표 3 참조).

· 여객열차지연비용 = 연간 업무용 시간가치(C1) + 연간 비업무용 시간가치(C2)

C1 = 업무 시간가치 × 업무통행비용 × 연간 이용인원 × 연간 지연시간

C2 = 비업무 시간가치 × 비업무통행비용 × 연간 이용인원 × 연간 지연시간

· 화물열차지연비용 = 화물시간가치 × 연간 수송량 × 연간 지연시간

##### ② 지연시간

철도통계연보(2002)에 의하면 1984년~2002년까지 총 지연건수는 590건으로 연평균 약 31건으로 나타났으며, 낙석에 의한 열차지연시간은 연평균 30시간이 발생하는 것으로 나타났다.

##### 2) 건설복 통행시 시간지연

철도건설비용에서의 통행시간지연비용은 건설비용을 통과하는 차량에 발생하는 지체시간에 의해 산정된다. 건설비용을 통과하는 차량은 일차운행회수에 의해 지체가 발생하는데 이에 대한 비용은 건설비용 통과교통량에 대한 자료를 바탕으로 도로에서의 사용자비용과 같다. 현재까지 건설비용 통과교통량에 대한 구체적인 통계자료는 갖춰져 있지 않은 실정이다.

표 3. 열차이용에 따른 통행시간비용 및 비용

여객	구분	통행시간 비율(%)	통행시간 비용
	업무시간	19.5	9,306원/인·시간
비업무시간	80.5	3,042원/인·시간	
화물		100.0	500원/톤·시간

#### (4) 지역경제손실비용

지역경제손실비용이란 철도의 운행 증이나 지연 등으로 인해 대상지역의 산업시설 혹은 상업시설에 미치는 간접적인 경제적 손실을 의미한다. 도로의 경우 Seskin(1990)은 간접적 지역경제 편익은 도로이용자 편익의 50%~150% 정도로 제시하고 있으나, 철도에서는 이에 대한 연구가 미비하며, 철도의 물류수송의 중요성을 고려할 때 안전측으로 도로의 최대비용인 150%로 가정하였다.

- 제3집단비용 산정식:  $C_3 = \phi C_4$

여기서,  $C_3$ : 제3집단비용,  $\phi$ : 간접경제손실율,  $C_4$ : 사용자비용

표 4. 도시규모별 손실율

구분	대도시	중소도시	기타
손실율	1.5	1.0	0.5
	가정	Ang. Seskin	가정

### 3.5 해체·폐기비용

해체·폐기비용은 자료가 거의 전무하므로 현단계에서는 교량구조물에 국한하여 적용하였다.

## 4. LCC분석 적용예

### 4.1 적용대상의 개요 및 가정사항

본 적용예는 최근 설계완료된 철도건설공사 중 "00철도건설공사"의 실시예단계에서 신형노선에 대한 최적대안 도출과정에서 분석된 것이며, 비교대안은 표 5와 같다. 분석기간은 60년, 할인율은 3.67%으로 적용하며 대안별 초기공사비는 표 6과 같다.

표 5. 00철도건설공사의 대안비교

구분	원안	대안 1	대안 2	대안 3
평면도				
총연장	10.25km	9.522km	9.556km	9.430km
교량	4,484m	4,279m	2,792m	5,531m
터널	2,555m	2,385m	2,912m	1,998m

### 4.2 분석결과

상기의 데이터 및 가정사항을 기초로 확률적 방법(시뮬레이션 10,000회 실시)에 의한 LCC분석을 수행한 결과를 그림 2와 표 7에 나타냈었다. 그림 2에는 사용자비용이 포함되어 있지 않다. 표로부터 대안2는 기본계획에 비해 95억원 정도 예산절감효과가 기대되는 절대우위를 가지며, 대안1에

비해서는 24억원의 절대우위를 갖는 것으로 평가할 수 있다. 그러나 그림 2로부터, LCC가 대안2에서 가장 발생빈도가 높은 약 2,500억원은 대안1의 2,524억원에 비해 낮아서 경제적이지만, 두 빈도그래프가 중첩되는 경우에 해당하는 확률만큼 대안1이 대안2보다 클 경우도 있다는 것을 나타냄으로써 LCC분석 실무자는 반드시 대안2가 아닌 대안1도 가치평가(VE)에 따라 대안으로 선정할 수 있는 폭넓은 선택을 할 수가 있다. 이로부터 확률적 방법이 각종 불확실성을 고려하여 비용평가를 하는 결과의 신뢰성 확보뿐만 아니라 다양한 선택의 기회를 확보할 수 있는 장점을 취할 수 있다.

표 6. 대안별 초기공사비 (단위:억원)

구 분	기본계획	대안1	대안2	대안3
토 공	79	141	192	158
교 량	697	668	454	863
터 널	780	728	889	610
케 도	111	105	106	105
총 계	1,667	1,642	1,641	1,736

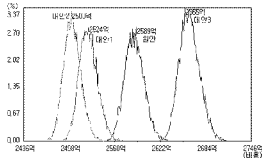


그림 2. LCC분석결과(확률밀도함수)

표 7. 항목별 LCC분석결과

(단위:억원)

대안	생애주기 비용	제2차 대비 상대차액	초기 비용	유지관리비용			폐기처분 비용	
				유지보수 비용	점진 및 진단비용	관리 비용		
기본	2,666	95	1,761	437	29	315	77	47
1	2,595	24	1,735	410	28	310	71	41
2	2,571	-	1,733	405	23	313	71	26
3	2,726	155	1,834	413	32	328	71	48

## 5. 결론

본 연구에서는 철도시설물의 LCC분석을 위한 비용으로 초기비용과 유지관리비용, 해체-폐기비용의 기준을 제시하였다. 또한 LCC분석의 비용항목 중에서 사용자비용인 철도이용자의 시간가치(여객, 화물)에 따른 열차지연비용을 도출하였다. 본 사례연구를 통해서 입력변수의 불확실성을 고려한 확률적 분석방법은 확정적 분석방법과 달리 발생확률에 따라 분석결과가 보다 폭넓은 해석을 수행할 수 있음을 확인할 수 있다. 철도노선 계획시 본 논문에서 제시된 비용항목과 분석기법을 이용하여 경제성 있는 철도노선의 선택을 위한 의사결정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 이후 철도노선 계획 및 설계시 적극 활용한다면 국가예산 절감의 효과도 도모할 수 있으며, 향후 철도시설물의 유지관리비 예산추정 및 적정 예산배정에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 대한교통학회(2003), "철도투자편람".
2. 한국개발연구원(2001), "2001년도 예비타당성조사 연구보고서".
3. 이규방, 윤하중, 김도일, 김태희, 여홍구, 박재민(2001), "민간투자사업의 운영관리비산정에 관한 연구", 국토연구원.
4. Walls, J. III and Smith, M. R.(1998), "Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design : In Search of Better Investment Decisions. Pavement Decision Interim Technical Bulletin", FHWA, US DOT.
5. 철도경(2002), "철도통계연보".
6. 신민호, 이성현, 김현기, 김정기, 노순미(2003), "낙석대책공법 비용편익분석기법 개발", 철도학회 2003년 추계학술대회논문.