

# 철도차량 획득단계에 적용되는 수명주기비용 모형에 관한 연구

## Life Cycle Cost Model for the Acquisition of Rolling Stocks

김종운†                      정광우\*                      정종덕\*\*                      한석윤\*\*\*  
Kim, Jong-Woon    Chung, Kwang-Woo    Chung, Jong-Duk    Han, Seok-Yun

### ABSTRACT

It is known that the operation and maintenance cost is generally higher than the acquisition cost of rolling stocks. It is very important for reducing the operation and maintenance cost to acquire the rolling stocks which are well designed with regard to the operation and maintenance cost. Therefore life cycle cost including the operation and maintenance cost is needed to be considered from the acquisition phase. This article presents a procedure and a model for life cycle cost which are applicable to the acquisition of rolling stocks.

### 국문요약

일반적으로 철도차량은 획득비용보다 운영·유지보수비용이 높다는 것이 알려져 있다. 운영·유지보수비용의 절감을 위해서는 운영·유지보수 비용 측면에서 효율적으로 설계된 철도차량을 획득하는 것이 매우 중요하다. 따라서 철도차량의 획득단계에서부터 운영·유지보수비용을 포함한 수명주기비용을 고려하는 것이 필요하다. 본 연구는 철도차량의 획득단계에서 수명주기비용을 고려하기 위한 절차 및 수명주기비용 모형을 제시한다.

### 1. 서 론

철도 운영기관 관점에서 철도차량의 수명주기비용(Life Cycle Cost: LCC)은 “철도 서비스를 승객에게 제공하기 위해 이루어지는 철도차량의 구입·운영·유지보수·폐기의 일련의 과정에 의해 발생되어지는 총 비용”으로 정의할 수 있다. 철도차량과 같은 대형시스템의 경우는 시스템 도입비용보다 도입이후부터 폐기시까지 소요되는 총 소비비용이 훨씬 큰 것이 알려져 있으며 Stern은 철도차량의 경우에는 일반적으로 운영 및 유지보수비용이 획득비용의 2배 정도를 차지한다고 하였다.[1,2] 또한 철도차량의 LCC는 운영정책의 효율 뿐 아니라 차량의 성능 및 특성에 크게 영향을 받는다. 즉 철도차량의 LCC를 구성하는 요소 중 획득비용보다 운영 및 유지보수비용이 더 크지만 LCC를 절감하기 위해서는 획득 이전 단계에서의 부터 LCC 절감 활동이 이루어져야 한다. 따라서 운영기관에서는 획득단계에서부터 LCC에 영향을 주는 차량의 성능 및 특성을 관리하여 LCC가 낮은 차량이 획득될 수 있도록 해야 한다.

Borghagen 및 Brinkhagen은 탬핑머신(tamping machine)의 획득 프로그램에 LCC를 적용한 사례를 제시하였다.[3] 철도차량에 대해 LCC 요구사항이 포함된 최초의 중요한 계약은 1986년 Adtranz(구 ABB)사와 SJ(Swedish State Railway)간에 이루어진 스위스 고속철도 X2000에 대한 것으로 이 계약에서는 프로젝트 기간과 상업운전 개시 후 1년 동안의 LCC 검증을 요구하였으며 요구조건을 충족하지 못할 경우

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 선임연구원  
E-mail : jong@krii.re.kr  
TEL : (031)460-5222 FAX : (31)460-5279

\* 정회원, 한국철도대학, 교수

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 수석연구원

에 재설계 및 설치 후 다시 1년간의 LCC 검증을 요구하고 최종적으로 실패할 경우 위약금을 물도록 명시한 바 있다.[4, 5] 이 후 LCC에 관한 사항은 유럽에서는 주요 계약요건 중 하나로 요구되고 있다. 국내의 경우에는 최근 들어 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)에 대한 요구사항이 발주사양서에 제시되는 사례가 점차 늘고 있지만 LCC 요구사항이 계약 요구조건으로 제시된 바는 현재까지 거의 없다.

발주사양서에 LCC 요구사항을 제시하여 획득단계에서 철도차량의 LCC를 관리하기 위해서는 철도차량의 LCC를 계산하는 모형이 제시되어야 하며 모형에 의해 계산되는 LCC 값은 검증 가능해야 한다. LCC 모형은 다수의 규격 등의 문헌에서 제시되었다. 국제전기기술위원회에서는 LCC 분석을 위한 규격

인 IEC60300-3-3을 제정하였으며 유럽철도산업연합(UNIFE: Union of European Railway Industries)은 LCC 계산을 위한 모형을 제시하였다.[6, 7] 또한 EC(European Commission)의 REMAIN 프로젝트 일환으로 철도인프라 장비의 LCC 분석을 위한 REMAIN LCC 모형이 제안되었다.[8] 미국에서는 SAE ARP 4293, 4294 규격[9] 등을 제정하고 제품 개발 초기부터 LCC 분석을 수행하고 있다. Stern은 철도차량의 획득단계에서 LCC를 적용하기 위한 기본 원칙을 제시하였다.[2] Kjellsson은 철도차량 획득단계의 LCC 적용사례를 통해 LCC 관리에 필요한 조건들을 기술하였다.[5]

국내의 경우에는 과거에는 철도차량에 대한 LCC 연구가 많지 않았으나 최근 들어 다수의 논문이 발표되었다. 박종목 등은 국외 전동차 LCC 연구동향 및 국제규격에 대응하기 위한 전략을 제시하였다.[10] 정종덕 및 배대성은 입환 기관차에 대한 LCC 분석을 통하여 기존 기관차의 대체 또는 수명연장을 결정하기 위한 경제성 분석을 수행하였다.[11] 전현규 등은 자기부상열차의 LCC 예측을 위한 모형을 제시하였고 파일럿 버전의 LCC 예측 소프트웨어를 개발하였다.[1, 12] 김재훈 등은 철도차량의 유지보수 비용 계산을 위한 유지보수정보 템플릿을 제안하고 차량부품에 대한 전주기 유지보수비용을 계산하였다.[13] 정광우 등은 도시철도차량의 수명주기비용 분석에 적합한 LCC 모형을 제안하였다.[14]

대부분의 기존 LCC 연구들은 특정 장치의 LCC 예측을 위한 연구들이다. 본 연구에서는 일반적인 철도차량의 획득단계에 적용할 수 있는 LCC 업무 절차 및 모형을 제시한다.

## 2. 철도차량 획득 LCC 업무 절차

철도차량 획득단계의 LCC 업무의 목적은 운영에 요구되는 차량의 성능은 만족하면서 LCC가 낮은 철도차량을 획득하는 것이다. 철도차량의 LCC 중 많은 비중을 차지하는 운영·유지보수 비용은 제작사의 1차적 관심 영역이 아니기 때문에 획득단계에서 LCC 요구사항이 적절히 제시되고 관리되지 않을 경우에는 운영자에게 높은 운영·유지보수 비용을 초래할 수 있다. 따라서 획득초기부터 운영자로부터 LCC 요구사항을 제시하여 LCC가 낮은 철도차량이 설계되고 제작될 수 있도록 해야 한다. LCC가 낮은 철도차량을 설계하는 일반적인 방법들로는 유지보수가 빈번히 일어나는 장치는 접근이 쉽도록 설계하여 유지보수 시간을 낮추는 방법, 유지보수 인력 및 자재비용이 많이 소요되는 품목에 대해 고 신뢰도의 제품을 사용하는 방법, 자가진단 기능 및 정확도를 높여 고장 발생 품목을 찾는 데 소요되는 시간이 적게 되도록 하는 방법 등이 있다. 또한 LCC의 절감은 통합 로지스틱 지원(Integrated Logistic Support: ILS) 분석 활동을 통해 효과적이고 효율적인 운영·유지보수 활동 정보를 운영자에게 제공함을 통해서도 이루어질 수 있다. 획득단계의 LCC 업무는 제작자의 이러한 LCC 절감 활동이 이루어질 수 있도록 해야 한다. Stern과 Hokstad은 획득단계 LCC 적용 경험을 바탕으로 도표 1과 같이 철도차량 획득을 위한 수명주기비용 업무 절차를 제안하였다.[2, 8] 위의 연구에서 제시한 절차는 운영자 중심의 LCC 활동들이다. 실제 LCC 활동은 운영자 및 공급자간의 상호 활동을 통해 이루어지며 수명주기별 각 주체별 LCC 활동을 정리하면 도표 2와 같다.

도표 1. 기존연구에서의 철도차량 획득을 위한 수명주기비용 업무 절차

Hokstad[8]	Stern[2]
1. LCC 모형의 수립	1. LCC 모형 및 사양서 개발
2. 운영 프로파일의 수립	2. 차량의 사용 방법 및 운영 프로파일 정의
3. 입찰 요청	3. 입찰 요청
4. 입찰 평가 및 보완	4. 입찰 평가
5. 입찰자와 협상	5. 입찰자와 협상
6. LCC 보증에 대한 계약	6. 계약
7. 인도	7. 필요할 경우 계약 변경
8. 검증	8. 인도
	9. 가용도 및 LCC 보증내용 검증

도표 2. 수명주기별 철도차량 수명주기비용 업무 활동 및 절차

프로젝트 단계	LCC 업무	
	운영자	공급자
예비 LCC 분석	- 과거 LCC 관련 데이터 및 경험 분석	
	- LCC 요구사항 설정(아래 사항 포함) •차량 운영 프로파일 •LCC 산출 모형 •LCC 평가 및 검증 방법 •패널티 및 인센티브	
입찰공고	- LCC 요구사항 제시	
		- LCC 예측 및 LCC 요구사항 달성 가능성 분석
계약 협상		- LCC 예측 프로세스 및 예측치 제시
	- LCC 예측 결과 평가 - 성능 및 LCC를 고려한 시스템 효과도 분석	
시스템 요구사항 정의		- LCC 분석 계획서 작성 - 하위아이템 LCC 할당
설계 및 구현		- LCC 추정 - LCC 요구사항을 만족하는 설계 구현 (RAMS 및 ILS 포함)
생산 및 시험		- LCC 관련 품질관리 및 보증 활동
시운전 및 수락	- LCC 입증 시험 수행	- LCC 입증 시험 수행
	- LCC 요구사항 검증 및 시스템 수락	
운영 및 유지보수	- 운영/유지보수 데이터를 통한 LCC 평가	

### 3. 철도차량 획득을 위한 LCC 모형

LCC에 관련된 대표적인 국제 표준은 1996년에 1판이 발표되고 2004년에 2판이 발표된 "IEC 60300-3-3 Dependability management Part 3-3 Application guide - Life cycle costing"이다. SINTEF에서는 철도인프라 장비의 LCC 분석을 위한 REMAIN LCC 모형을 제안하였다. Stern은 철도차량의 획득 단계에서 LCC를 적용하기 위한 기본 원칙 및 모형을 제시하였다.[2] 국내에서는 김재훈 등[13] 및 정광우 등[14]이 철도차량의 수명주기비용 분석을 위한 LCC 모형을 제안하였다. 하지만 위에서 제시된 LCC 모형들은 철도차량 획득을 위한 LCC 평가에 포함되어야 할 부분이 일부 빠져있거나 각 비용요소의 계산 방법이 구체적으로 제시되어 있지 않아서 철도차량 획득을 위한 LCC 모형으로 사용하기에 다소 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 철도차량의 획득단계에서 적용할 수 있는 LCC 모형을 제시한다.

3장에서 제시하는 LCC 모형의 비용분류체계(Cost Breakdown Structure: CBS)는 도표 3과 같다. 도표 3의 CBS는 두 가지 원칙을 가지고 개발되었다. 첫째, 철도차량의 성능 및 특성에 따라 달라지는 비용요소만을 고려하였다. 그 예로 철도차량의 승무원의 수는 운영자에 의해 철도차량의 획득단계 이전에 결정되므로 입찰한 철도차량의 성능 및 특성에 따라 달라지지 않는다. 따라서 승무원 인건비용은 고려하지 않았다. 둘째, LCC 수락단계까지 검증 가능한 비용요소만을 고려하였다. 철도차량의 안전사고에 대한 손실비용은 운영자의 대표적 손실비용이지만 공급자가 제시한 안전사고 손실비용의 적합성 여부를 시스템 수락이전에 검증하는 것은 매우 어렵다. 따라서 안전사고에 대한 손실비용은 고려하지 않았다. 안전사고에 대한 손실은 RAMS 요구사항에서 규제하는 것이 더욱 적합할 것으로 판단된다. 폐기비용 또한 운영자에게 발생하는 LCC 요인이지만 수락단계에서 검증하기가 어렵기 때문에 포함하지 않았다. 이와 같은 원칙은 공급자가 책임져야 하고 검증 가능한 LCC 모형을 제시함으로써 LCC가 철도차량의 설계 단계에서부터 고려되도록 하기 위함이다.

도표 3. 철도차량 획득 수명주기비용 구성 요소

수명주기비용	
초기 투자비용	유지보수비용
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 차량 구입 비용</li> <li>- 초기 예비품 구입 비용</li> <li>- 운영·유지보수 장비 구입 비용</li> <li>- 초기 교육 및 문서화 비용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 청소비용                             <ul style="list-style-type: none"> <li>•인건비</li> <li>•청소 소모품 비용</li> </ul> </li> <li>- 예방정비 비용                             <ul style="list-style-type: none"> <li>•인건비</li> <li>•예비품/수리부품 소요비용</li> </ul> </li> <li>- 보수정비 비용                             <ul style="list-style-type: none"> <li>•인건비</li> <li>•예비품/수리부품 소요비용</li> </ul> </li> <li>- 장비 유지보수 비용</li> </ul>
운영비용	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 운영 소모품 비용</li> <li>- 에너지 소비 비용</li> <li>- 선로 사용 비용</li> <li>- 서비스 지연에 따른 비용</li> </ul>	

#### 3.1 초기 투자비용

초기투자비용은 철도차량 및 초기 예비품, 운영·유지보수 장비 구입 비용 및 초기 문서화 및 교육에 소요되는 비용을 포함한다.

##### 3.1.1 차량 구입비용 (AcTr)

구입하는 철도차량의 전체 편성에 대한 구입비용은 아래와 같이 계산된다.

$$ACTr = NoTr \times PTr$$

NoTr = 구입하는 철도차량 편성의 수  
 PTr = 구입하는 철도차량 편성의 구입단가

### 3.1.2 초기 예비품 구입비용 (ICSp)

초기 예비품은 철도차량의 유지보수에 사용되는 품목을 철도차량의 획득과 함께 구입하는 아이템이다. 초기 예비품의 구입비용은 아래의 식과 같이 계산된다. 아래의 식에서 예비품의 초기 구입개수는 LCC 뿐 아니라 차량의 운영가용도에도 영향을 주게 된다. 따라서 예비품 수량은 LCC와 운영가용도 간의 상관관계를 고려하여 결정되어야 한다. 본 논문에서는 예비품 수량 산정 방법에 대해서는 다루지 않는다.

$$ICSp = \sum_{i=1}^{NoCSp} NoCSp(i) \times PCSp(i)$$

NoCSp = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 예비품 종류의 개수  
 NoCSp(i) = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i번째 예비품의 초기 구입개수  
 PCSp(i) = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i번째 예비품의 구입단가

### 3.1.3 운영·유지보수 장비 구입비용 (ICEq)

철도차량의 도입과 함께 구입하는 운영 및 유지보수 장비의 구입비용을 말하며 아래의 수식에 의해 계산된다. 운영 및 유지보수 장비의 구입 수량 또한 LCC 와 운영가용도에도 영향을 주게 되므로 이 둘의 고려하여 결정하여야 한다. 본 연구에서는 장비 수량 산정 문제는 다루지 않는다.

$$ICEq = \sum_{i=1}^{NoCEq} NoCEq(i) \times PCEq(i)$$

NoCEq = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 운영 및 유지보수 장비 종류의 개수  
 NoCEq(i) = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i번째 운영 및 유지보수 장비의 구입개수  
 PCEq(i) = 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i번째 운영 및 유지보수 장비의 구입단가

### 3.1.4 교육 및 문서화 비용

철도차량의 운영 및 유지보수 인력의 초기 교육 및 문서화에 소요되는 비용이다.

## 3.2 운영 비용

운영 및 폐기비용은 철도차량의 운영시점부터 폐기시점까지 소요되는 운영 소모품 비용, 에너지 소비 비용, 선로 사용 비용, 서비스 지연에 따른 비용을 포함한다.

### 3.2.1 운영 소모품 비용 (OpMC)

철도차량의 운영에 소모되는 물품 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$OpMC = NoTr \times LT \times YOMC$$

LT = 철도차량의 사용년한  
 YOMC = 편성당 연간 운영소모품 비용

### 3.2.2 에너지 소비 비용 (EC)

에너지 소비 비용은 철도차량의 운행에 필요한 총 에너지 비용으로 다음과 같이 계산된다. 아래의 식 중 UEC는 에너지 연료 구입 및 CO2 배출에 대한 비용 등 에너지 소비에 관련되는 비용을 포함한다.

$$EC = NoTr \times TRD \times UEC$$

TRD = 철도차량 수명주기동안 편성당 총 운행거리  
 UEC = 단위 운행거리당 소비되는 에너지비용

### 3.2.3 선로 사용 비용 (RUC)

선로의 사용료가 중량에 비례하여 부과된다면 선로사용료가 LCC에 포함되어야 하며 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$RUC = NoTr \times TrW \times TRD \times URC$$

TrW = 열차 1편성의 중량  
 URC = 단위중량-단위운행거리 당(예: 톤-키로) 선로사용료

### 3.2.4 서비스 지연에 따른 비용 (PCSE)

서비스 지연비용은 다음과 같이 계산된다.

$$PCSE = NoTr \times \frac{TOT}{MTBSF} \times LT \times PCSE$$

MTBSF = 평균 서비스 고장간격(시간)  
 PCSE = 1회 서비스지연에 대한 패널티 비용

## 3.3 유지보수 비용

유지보수 비용은 청소비용, 보수정비 비용, 예방정비 비용, 장비 유지보수 비용으로 구성된다.

### 3.3.1 청소비용 (CC)

청소비용은 수명주기동안의 차량의 청소에 소요되는 총 비용으로 다음과 같이 계산된다.

$$CC = NoTr \times NoCl \times (MMH_{CL} \times ULC_{CL} + MC_{CL})$$

NoCl = 편성당 수명주기동안 총 청소회수  
 MMHCL = 1회 청소에 필요한 평균인시  
 ULCCL = 청소 인력의 단위시간당 임금  
 MCCL = 1회 청소에 소모되는 자재비용

### 3.3.2 보수정비 비용 (CMC)

보수정비 비용은 차량고장을 수리하기 위해 수행되는 보수정비의해 발생하는 비용으로 다음과 같이 계산된다.

$$CMC = NoTr \times \frac{TOT}{MTBLF} \times LT \times (MMH_{CM} \times ULC_{CM} + MC_{CM})$$

MTBLF = 평균 로지스틱 고장시간  
 MMHCM = 1회 보수정비 수행에 필요한 평균인시  
 ULCCM = 보수정비 인력의 단위시간당 임금  
 MCCM = 1회 보수정비에 소모되는 예비품의 평균 비용

### 3.3.3 예방정비 비용 (PMC)

공급자는 차량의 고장을 예방하기 위한 예방정비 프로그램을 제공한다. 예방정비 비용은 이러한 예방정비를 수행하는 소요되는 비용으로 다음과 같이 계산된다. 단 예방정비 수행 시 발견되는 고장의 수리

비용은 예방정비비용에 포함되지 않고 보수정비비용에 포함된다.

$$PMC = NoTr \times \sum_{i=1}^{NoPM} \frac{TOT}{MTBM(i)} \times LT \times \{MMH_{PM}(i) \times ULCPM(i) + MCPM(i)\}$$

NoPM = 예방정비 종류의 수

MTBM(i) = i번째 예방정비의 평균간격(시간)

MMHPM(i) = i번째 예방정비 수행에 필요한 평균인시

ULCPM(i) = i번째 예방정비 인력의 단위시간당 임금

MCPM(i) = i번째 예방정비에 소모되는 예비품의 평균 비용

### 3.3.4 장비 유지보수 비용 (MCEq)

장비 유지보수 비용은 차량의 운영·유지보수에 필요한 장비의 유지보수 비용으로 다음과 같이 계산된다.

$$MCEq = NoTr \times LT \times \sum_{i=1}^{NoEq} \{NoEq(i) \times YMCEq(i)\}$$

NoEq = 운영 및 유지보수 장비 종류의 개수

NoEq(i) = i번째 운영 및 유지보수 장비의 개수

YMCEq(i) = i번째 운영 및 유지보수 장비의 연간 유지보수 비용

## 4. 결론

본 연구에서는 철도차량의 성능 및 특성에 의해 영향을 받는 수명주기비용을 규정하고 수명주기비용이 저렴한 차량이 제작되고 공급될 수 있는 절차 및 모형을 정의하였다. 본 연구의 결과는 수명주기비용이 낮은 차량의 설계기술 발전을 유도하고, 수명주기비용이 저렴한 차량이 획득되고 운영되는데 기여할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 “도시철도표준화 2단계 연구개발사업”의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 전현규, 김재훈, 김종운, 박준서 (2007) “자기부상열차 수명주기비용모델 개발을 위한 기초연구”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 76-83.
2. J. Stern (1994), "Life Cycle Cost : A Method for Reducing Costs and Improving Railway Vehicles" Proceedings of World Congress Railroad Research, pp. 661-666.
3. L. Borghagen, and L. Brinkhagen (1984), "LCC-Procurement at the Swedish State Railways" Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.349-358.
4. B. Burström, G. Ericsson, and U. Kjellsson (1994), "Verification of Life-Cycle Cost and Reliability for the Swedish High Speed Train X2000", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.166-171.
5. U. Kjellsson (1999), "From X2000 to Crusaris Regina : Development of LCC Technology" Proceedings of World Congress Railroad Research, pp. 1-7.

6. IEC 60300-3-3 (2004), "Application Guide for Life Cycle Costing", IEC International Standard
7. UNIFE LCC Group (1997) "Guidelines for Life Cycle Cost", Union of European Railway Industry.
8. P. Hokstad (1998), "Life Cycle Cost Analysis in Railway Systems", SINTEF Industrial Management.
9. SAE ARP 4293, 4294 Aerospace Recommended Practice (1992), "Life Cycle Cost Techniques and Applications", USA Standard.
10. 박종목, 김필환, 이종권 (2002), "전동차 수명주기비용에 대한 고찰", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp 396-407.
11. 정종덕, 배대성 (2005), "입환기관차의 LCC 평가분석", 한국철도학회논문집, 제8권 제3호, pp. 260-266.
12. 전현규, 김재훈, 김종운, 박준서 (2007) "유지보수관점에서의 수명주기비용 예측 소프트웨어 개발", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 773- 779.
13. 김재훈, 전현규, 박준서, 정현용 (2009) "철도차량 유지보수정보를 이용한 수명주기비용 계산 연구", 한국철도학회논문집, 제12권 제1호, pp.88-94.
14. 정광우, 김철수, 안승호, 전영석, 김재문, 한석윤 (2008), "도시철도차량의 수명주기비용 분석의 적용에 대한 고찰" 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 715-726.