

# 도시철도 차량에서 수명주기비용의 검증

## Verification of Life-Cycle Cost for the Urban Railway Vehicle

정광우†, 전영석\*, 안준용\*, 김철수\*, 정종덕\*\*  
Kwang-Woo Chung, Young-Seok Jeon, Joon-Yong An, Chul-Su Kim, Jong-duk Chung

---

### ABSTRACT

The application of LCC-techniques is being introduced at the on-going procurement programs of various techniques. LCC-techniques have the common characteristic that all are designed to motivate contractors to design, manufacture and deliver equipment with lower life cycle costs. You may believe that savings may be in the acquisition cost component of life cycle costs. However, primary emphasis is generally on reducing and controlling operating and support costs by transferring more responsibility to the contractor for equipment operating and support cost performance. It has been found that life cycle cost procurement provisions must be individually tailored to each program. In this study, the currently identified LCC procurement techniques including a variety of LCC incentive provisions are introduced. Moreover, verification method, a procedural issue and incentive to application of LCC-techniques are examined.

---

### 1. 서 론

현재 도시철도 차량의 조달과정에서 다양한 LCC 기술이 도입되고 있다. LCC 기술은 도시철도 차량의 획득비용의 적절성 뿐만아니라 운영 및 유지보수 비용 등 도시철도 차량의 수명주기 동안에 발생하는 비용 발생 요인을 찾아내고 이를 전체적으로 최적화하기 위한 기술로써, 차량 성능과 비용 효율성과의 균형점을 찾아가는 기술이다.

LCC 기술은 낮은 총 비용과 높은 신뢰성을 성취하기위한 효율적인 도구로써, 도시철도차량의 운영 및 지원 비용 성능에 대한 일부 책임을 계약자(차량공급자)와 공유함으로써 운영 및 지원 비용을 절감하고 통제하기 위한 수단이며, 계약자로 하여금 더 낮은 수명주기비용을 가진 차량을 설계, 제조, 납품할 수 있도록 동기를 부여하는 것이다.

LCC 분석은 차량 공급자에 의해 제공되는 기술적 자료에 주로 근거를 두고 있다. 만일 자료가 부정확하다면, 이것은 철도 운영자에게 상당한 손실을 가져올 것이며, 추가 비용을 유발하는 원인이 될 것이다. 이때, 차량 공급자는 어느 정도 책임을 져야하는지에 대한 책임성 문제가 발생되며, 차량 공급자가 제공한 자료에 근거한 LCC 예측값과 실제 LCC 값과의 편차를 어떻게 확인할 것인가에 대한 방법론의 설정이 필요하다. 따라서, 도시철도 차량의 조달과정에서 LCC 검증은 필수적인 부분이며, 검증 결과에 대한 보증 문제에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 도시철도 차량의 조달과정에서 LCC 기술을 적용하기 위하여 필요한 LCC 검증 방법 및 절차에 대하여 논의하고, LCC 성과에 따른 인센티브와 페널티 적용 방법에 대하여 논의한다.

---

† 정회원, 한국철도대학 운전기전과 교수  
E-mail :ckw1201@hanmail.net  
TEL : (031)460-4278 FAX : (031)462-2944  
\* 한국철도대학 교수  
\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

## 2. 도시철도 차량 조달 과정

### 2.1 LCC 분석 이점 및 절차

수명주기비용 기술은 낮은 총 비용과 높은 신뢰성을 성취하기 위한 효율적인 도구이다. 도시철도 차량은 전체 조달 과정(입찰에서 운영까지)동안 지속적이고 체계적인 LCC 분석이 요구되며, 이를 통하여 매우 신뢰할 수 있는 도시철도차량을 획득할 수 있고, 더 낮은 고장률과 짧은 수리시간을 성취함으로써 도시철도 차량의 가용성을 향상하고, 운영 및 관리 비용을 절감할 수 있다.

철도 운영자 입장에서는 매우 잘 정의된 제품은 계약서에 서명할 때 이미 달성될 수 있으며, 계약자는 가용성 성과에 비중을 두고 차량 설계 및 제작에 매진할 것이며, 서로 다른 기술적 대안에 대한 모든 관련 비용을 산출하고, LCC에 가장 적합한 해결책을 선택하는 것이 가능해질 것이다. 만약 낮은 LCC가 예측되고 궁극적으로 검증된다면, 철도 운영자 입장에서는 도시철도 차량의 전체 수명동안 낮은 운영 및 지원비용의 혜택을 받을 수 있을 것이다. LCC 기술은 계약자에게도 또한 이점이 있다. 계약자는 고객의 제품사용 의도를 통찰할 수 있는 기회를 얻을 수 있으며, 서로 다른 비용에 존재하는 가치를 얻을 수 있으며, 이를 제품 개발에 반영할 수 있다. 또한 계약자는 도시철도 차량의 가용성 성능이 경제적 측면에서 평가되기 때문에 서로 다른 기술적 해결책에 대한 평가 도구로 활용할 수 있으며, 낮은 고장률을 갖는 도시철도차량의 설계 및 생산에 대한 동기를 부여받을 수 있고, 생산비용과 특정 운영 및 지원 비용사이의 적당한 트레이드오프(trade-off)의 통제 및 결정수단으로 사용함으로써 최대 이익을 달성할 수 있다.

이와 같이 LCC 기술은 철도운영자 입장에서나 계약자입장에서 모두 이점을 갖고 있으며, 상호 협력하여 최적의 획득, 운영 및 관리 비용을 산출하는 것이며, 차량 설계와 비용요소를 상호 결합함으로써 비용 효율성을 최적화할 수 있다.

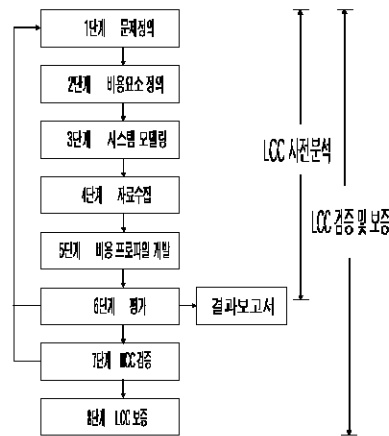


그림 1. 8단계 LCC 분석 절차(안)

일반적으로, 도시철도차량의 조달과정은 계획 단계에서부터 입찰, 계약, 설계, 납품의 각 단계를 걸쳐, 철도 운영에 이른다. 이때 사용될 LCC 분석 절차는 그림1과 같이 정의한다.

LCC 분석 절차는 크게 LCC 사전분석 단계와 LCC 검증 및 보증 단계로 구분할 수 있다. LCC 사전 분석 단계는 조달과정의 계획단계에서 우선협상자 선정단계까지 사용될 LCC 분석 절차로, 철도운영기관은 유사 시스템의 운영 자료를 기반으로 사전 조사한 자료와 입찰자가 제공한 기술적 자료를 기반으로 LCC 분석을 수행한다. LCC 사전분석 결과는 차량의 획득비용과 운영 및 유지보수 비용 측면에서의 입찰자를 평가하고, 평가 결과에 따라 협상적격자를 선정하고, 협상순위를 결정하는데 활용한다.[1-5]

LCC 검증 및 보증 단계는 비용 효율성이 높은 차량을 설계, 제작, 납품 및 시운전을 위한 LCC 평가로 운영기관과 계약자간의 상호 협력이 중요하며, 계약에 명시된 RAMS/LCC 요구사항에 대한 LCC 검증 및 보증 작업이 진행된다. 이 단계에서는 이미 계약에서 차량의 획득가격은 결정이 되어 있기 때문에, 차량 운영 및 유지보수 비용에 집중하여 LCC를 재평가하며, 이때 평가에 사용되는 자료는 설계 및 시운전 결과

를 기반으로 평가를 진행한다.

## 2.2 LCC 조달 기법

LCC 조달 기법을 사용하기 위해서는 도시철도 차량의 계획 단계에서, 철도 운영자는 지금까지의 기술 수준과 유사 시스템의 운영 자료 및 경험을 참고로 하여 LCC 목표(안전성, 신뢰성, 가용성, 유지보수 등의 정량화된 목표)를 정의하고, 사업화 계획에서는 이들 목표를 발주사양서 상의 요구값으로 전개할 필요가 있다.

다음은 발주사양서에 포함되어야 할 요인들이다.

### (1) LCC 평가의 원칙

: 입찰자에 의해 제공된 자료를 기반으로 LCC 평가를 수행하기 때문에, 제공된 자료에 함축된 제품의 특성을 보장할 수 있는 자료의 누락 혹은 오류는 입찰자의 거절 혹은 책임성의 사유가 될 수 있다는 것을 명문화하여야 한다.

### (2) 가용성 성능을 위한 공급자의 책임

: 기술설계 단계 동안에 대안의 기술적 해결책의 지속적인 분석을 포함하여 가용성 성능 개선 및 검증 프로그램이 실행될 것이라는 것을 명문화하여야 한다.

### (3) 공급자로부터 예상되는 보증은 기술되어야 한다

### (4) 차량 운영 조건

: 차량단 규모, 일일 열차 키로, 연간 열차 키로, 표정 속도 등 LCC 제안을 위한 기초 운영 조건은 제시되어야 한다.

### (5) 유지보수 환경

: 유지 보수 조직의 구성, 유지보수 장비, 유지보수 주기 등에 대한 자료가 제시되어야 한다. 만일 입찰자가 유지보수에 필요한 자원 혹은 장비의 누락을 확인했을 경우, 추가 장비의 필요성을 제안할 수 있어야 한다.

### (6) 사전 LCC 계산 모델

: 발주사양서와 더불어 사전 LCC 계산 모델이 입찰자들에게 제공되어야 한다.

### (7) 평가를 위해 필요한 자료는 입찰서에 포함될 수 있도록 신중하게 지정하여야 한다.

현재 확인된 LCC 기술은 조달 계약에서 다양한 LCC 인센티브 조항을 포함하고 있다. LCC 조달 인센티브 조항은 더 낮은 LCC 시스템 혹은 장비를 구매하기 위하여 계약자에게 동기를 부여하기 위하여 설계된 계약 규정으로 다음과 같은 것이 있다.[6]

#### (1) 공급자 선택 기준

#### (2) 사전 사정 시험

#### (3) 설계원가절감/LCC 상세설계

#### (4) 신뢰성 및 유지보수성 수용 기준

#### (5) LCC 인센티브 조항

- 포상 요금 지급

- 신뢰성 향상 보증(RIW, Reliability Improvement Warranty)

: MTBF 보증을 포함한 신뢰성 향상 보증

: 신뢰성 입증 인센티브

: 인센티브를 갖는 고정 수리 가격

: 설계 원가절감 인센티브

: 가치공학 인센티브

위에 나열한 모든 LCC 인센티브 조항은 계약자(혹은 제품 공급자)가 낮은 수명주기비용 특성을 갖고 있는 제품을 설계하고 제공함으로써 그들이 받을 수 있는 이득을 예상할 수 있는 계약상의 조건들을 포함하고 있다. 공급자 선택기준과 사전 사정시험은 제품 공급자에게 더 낮은 LCC를 취할 수 있는 조치사항을 포함하고 있으나, 운영 및 지원 비용에 대한 성능과 연관된 인센티브는 포함하지 않는다. 세 번째와 네 번

제 조달 기법은 반드시 만족되어야 하는 운영 및 지원 비용을 다루고 있으나, 지정된 성능 이상의 제품 성능 개선을 위한 인센티브는 없다. LCC 인센티브 조항은 현재 많이 이용되고 있는 조달 기법으로 제품의 획득비용뿐만 아니라 운영 및 지원비용에 대한 계약자의 책임성을 부과하고 있으며, LCC 성과 달성 정도에 따라 인센티브 혹은 패널티를 적용한다.

RIW의 목적은 차량 공급자에게 고장에 대한 낮은 고장 수리비용 뿐만 아니라, 운영에 따른 낮은 고장율을 갖는 차량의 설계 및 생산에 대한 동기를 부여하는 것으로, RIW는 비용의 변화 없이 고장난 장치의 수리 혹은 대체 뿐만아니라, 교정, 조정 및 시험을 제공할 것이다.

도시철도 차량의 경우, 현재 많은 유사 차량에 대한 상당한 경험이 있고, 불확실성이 주로 차량의 설계 및 품질관리 측면에서 발생되고 있기 때문에 신뢰성 향상 보증의 개별적 혹은 상호 결합에 의해 적용 가능하다.

### 3 LCC 검증 및 보증

LCC 사전분석(계획단계에서 우선협상자 선정까지)은 입찰자의 제안 내용을 근거로 협상자의 우선 순위를 결정하기 위한 사전 분석의 의미를 갖으며, LCC 분석은 차량의 획득 비용과 운영 및 지원비용 모두를 고려하여 분석한다. 이후 도시철도 차량 조달 과정의 협상단계는 향후 진행될 LCC 검증 및 보증을 위한 세부적인 절차와 범위에 대하여 운영자와 협상자간의 합의가 진행되며, 합의된 내용이 계약서에 명문화되게 된다.

다음과 같은 주요 협상 내용은 계약서에 포함되어야 한다.

#### (1) LCC 계약 한계의 설정

LCC 사전 분석의 결과와 당사자간 합의에 의한 계약서상의 LCC 한계(LCC 지급보증)

이것은 향후 LCC 성과에 따른 패널티 혹은 인센티브 적용의 기초가 된다.

#### (2) 획득 비용의 확정

#### (3) LCC 검증 절차 및 범위

#### (4) LCC 검증 이후의 처리 방안

검증된 LCC값이 LCC 계약 한계를 초과할 때의 처리 방안

### 3.1 LCC 검증 절차

계약에서 취해진 엄격한 신뢰성 및 LCC 요구사항 관점에서, 성공적인 프로젝트를 위한 전제조건은 차량 설계 과정에서 LCC와 신뢰성 고려사항을 통합하는 것이다. 차량 가격은 이미 계약서에 설정되었기 때문에, 이후 LCC 작업은 운영 및 유지보수 비용에 집중되어 수행된다.

LCC 검증의 원칙인 계약서의 LCC 계약한계와 설계 단계 동안의 예측된 LCC 설계한계, 시운전등을 통해 확보된 실제 운영 경험에 기초한 LCC 검증/보증 한계를 상호 비교하는 단계로 차량의 성능을 향상하고 낮은 LCC 실현을 위해 매우 중요한 단계이다.

LCC 검증 절차의 목적은 패널티를 물리기 위한 목적보다는 오히려 차량의 신뢰성과 유지보수 및 운영 성능의 개선을 위하여 계약자에게 동기를 부여하는 것이다. 왜냐하면, 패널티는 신뢰할 수 없는 차량에 의해 유발되는 운영 및 유지보수 비용의 증가 및 이익의 손실을 결코 보상할 수 없기 때문이다.

#### (가) LCC 관리 및 검증 체계 확립

LCC 검증은 운영자와 계약자간의 상호 협력 활동이 중요하며, 신뢰성과 LCC를 공동으로 관리하고 서로 합의된 검증 절차에 의해 프로젝트 성공을 위한 최선의 해결책을 모색하는 것이 중요하다.

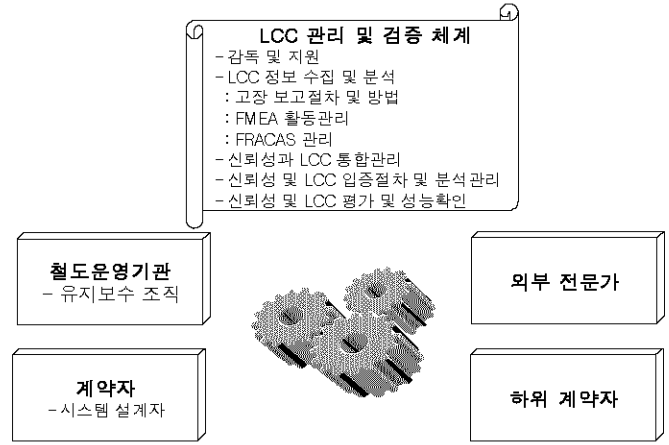


그림 2. LCC 관리 및 검증 체계 및 주요 업무

(나) LCC 검증 모델

LCC 분석 작업은 운영 및 유지보수 비용에 집중되어 수행되기 때문에 다음과 같이 간소화된 모델을 사용 한다.

(1) 운영 비용

- 운영 소모품 비용

$$\text{운영 소모품 비용} = \text{총 편성수} \times \text{사용년한} \times \text{편성당 연간 운영 소모품 비용}$$

- 에너지 소비 비용

$$\text{에너지 소비 비용} = \text{총 편성수} \times \text{편성당 총 운행거리} \times \text{단위 운행 거리당 에너지 소비 비용}$$

- 서비스 지연에 따른 비용 (PCSE)

$$\text{서비스 지연 비용} = \frac{\text{총 운행시간}}{\text{평균 서비스 고장간격 (MTBSF)}} \times \text{사용년한} \times \text{서비스 지연 패널티 비용}$$

(2) 유지보수 비용

- 보수정비 비용

차량의 고장을 수리하기 위해 수행되는 보수정비의해 발생하는 비용

$$\text{보수 정비 비용} = \text{총 편성수} \times \frac{\text{총 운행시간}}{\text{평균 로지스틱 고장시간 (MTBLF)}} \times \text{사용년한} \times (\text{MMH}_{CM} \times \text{ULC}_{CM} + \text{MCCM})$$

MMHCM = 1회 보수정비 수행에 필요한 평균인시

ULCCM = 보수정비 인력의 단위시간당 임금

MCCM = 1회 보수정비에 소모되는 예비품의 평균 비용

- 예방정비 비용

예방정비를 수행하는 소요되는 비용으로 다음과 같이 계산된다. 단 예방정비 수행 시 발견 되는 고장의 수리 비용은 예방정비비용에 포함되지 않고 보수정비비용에 포함된다.

$$\text{예방정비 비용} = \text{총 편성수} \times \sum_{i=1}^{\text{NoPM}} \frac{\text{총 운행시간}}{\text{MTBM}(i)} \times \text{사용년한} \times \{ \text{MMH}_{PM}(i) \times \text{ULC}_{PM}(i) + \text{MCPM}(i) \}$$

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

(다) 차량 설계와 LCC의 통합

신뢰성과 LCC에 가장 큰 영향을 미치는 중요한 작업은 설계단계 동안에 실행된다. 설계 과정에서 신뢰성과 LCC 고려사항의 통합을 위해서는 시스템 설계자들의 높은 수준의 참여 보장이 가장 효율적이며, 설계자의 기술적 경쟁력을 향상이 중요하다.

(라) 자료 수집 및 분석

검증 과정속에서 현장에서 발생하는 고장 이력을 수집하고 분석하기 위해서 FMEA(Failure mode and effects analysis)를 기반으로 FRACAS(Failure Reporting & Corrective Action System)수행 한다. 이때 사용되는 보고서 양식은 고장의 유형 및 영향에 관련된 고장 이력뿐만 아니라, 유지보수 소요시간, 예비품 사용, 정비 인원, 장비사용현황 등 LCC 분석에 관련된 정비 내용을 포괄적으로 포함할 수 있는 양식을 개발하여 사용한다. 이는 현장에서 발생된 실질 운영 자료를 기반으로 예방 정비과 보수 정비 주기 조절 및 예비품 예측을 통하여 전체 LCC를 최적화하는데 목적이 있다.

(마) LCC 입증

프로젝트 단계의 시제차 시험, 생산, 납품 및 시운전 단계는 실제 신뢰성 및 LCC 관련 운영 경험 자료를 얻을 수 있는 단계이다. 이 단계에서는 계약상에 설정된 요구사항과 설계 과정에서 예측된 값, 실제 자료를 상호 비교함으로써 프로젝트의 목적 달성을 확인할 수 있다. LCC 입증은 주로 신뢰성 파라미터를 중심으로 확인되기 때문에 신뢰성 파라미터는 예방 정비와 고장정비 활동에 관련된 정보를 포함하고 있는 것을 선택한다.

- 신뢰성 관련 영역

: 고장률, MTBF, MTTR

- LCC 관련 영역

가용성, 유지보수성(예방정비/보수정비), 소모품(혹은 예비품) 사용률, 에너지 사용률

- 비용인자(cost driver)의 확인 및 품질보증

주요 비용발생 품목의 확인을 통하여 잠재적인 LCC 개선을 위한 지침을 마련

(바) LCC 모델 갱신

설계과정 속에서의 계약 변경은 신뢰성 성능의 영향뿐만 아니라 LCC에 큰 영향을 미치기 때문에 계약 변경에 따른 LCC 영향을 고려하여야 하며, 또한 LCC 입증과정에서의 실제 신뢰성 및 LCC 관련 자료를 기반으로 LCC 모델의 갱신이 필요하다. 그러나 실제 운영 경험 자료는 아직도 불확실성이 내포되어 있다. 따라서, 특정 아이템들의 유지보수성 검증 결과로부터 수정계수를 도입하여 정규화하는 것이 필요하고, 이를 기반으로 LCC 모델의 갱신이 요구된다.

예를 들어, MTTR 수정계수 K는 다음과 같은 것을 활용할 수 있다.

$$K = \frac{\sum_{k=1}^n (\text{수량} \times \text{고장률} \times MTTR_{\text{검증}})}{\sum_{k=1}^n (\text{수량} \times \text{고장률} \times MTTR_{\text{예측}})}$$

3.2 LCC 보증

LCC 검증 결과와 LCC 모델 갱신 결과를 기반으로 LCC 검증/보증한계의 설정이 필요하다. 이것은 계약의 인센티브 혹은 페널티 적용의 기준 자료로 활용할 수 있으며, 차량의 영업운전 혹은 하자보수 기간 동안의 LCC 지급보증의 책임성을 지정하여야 한다.

$$\frac{LCC \text{ 검증/보증 한계} - LCC \text{ 계약 한계}}{LCC \text{ 계약 한계}} < 0.1$$

만일, LCC 검증/보증한계가 LCC 계약한계의 110%를 초과할 경우, 계약자에게 페널티를 부가하게 될 것이며, 만일, LCC 검증/보증한계가 LCC계약 한계의 90% 미만일 경우, 계약자에게는 인센티브를 적용하게 될 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 도시철도 차량의 조달과정에서 LCC 기술을 적용하기 위하여 필요한 LCC 검증 방법 및 절차에 대하여 논의하고, LCC 성과에 따른 인센티브와 페널티 적용 방법에 대하여 논의하였다. LCC 검증 및 보증은 운영 및 유지보수 비용에 집중하여 수행되며, 이때 사용될 간단한 LCC 모델을 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 “도시철도표준화 2단계 연구개발사업”의 일환으로 국토해양부의 연구지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. IEC 60300-3-3, 2004, "Application Guide for Life Cycle Costing" IEC International Standards.
2. ISO15663-1, 2000, "Petroleum and natural gas industries -Life cycle costing part 1 Methodology"
3. SAE ARP 4293 Aerospace Recommended Practice, 1992. Life Cycle Cost-Techniques and Applications, USA Standards.
4. NORSOK O-CR-001, 1996, "Life cycle cost for systems and equipment"
5. NORSOK O-CR-002, 1997, "Life cycle cost for production facility"
6. Maj. Altan ÖZKİL, "Life Cycle Cost Procurement Techniques", RTO SAS Symposium, 24-25 October 2001.
7. Lennart Borghagen, Leif Brinkhagen, "LCC-Procurement at the Swedish State Railways" Proceeding Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium, (1984)