

철도차량 획득을 위한 수명주기비용 모형 및 적용 절차

A Life Cycle Cost Model and Procedure for the Acquisition of Rolling Stocks

김종운¹ · 정광우[†] · 박준서¹ · 정종덕¹

Jong-Woon Kim · Kwang-Woo Chung · Jun-Seo Park · Jong-Duk Chung

Abstract Operation and maintenance cost of a rolling stock is generally higher than its acquisition cost. Therefore, it is necessary for reducing life cycle cost (LCC) to make rolling stocks easy and low costly for operation and maintenance. In addition, their operation and maintenance support systems should be effective and efficient. To accomplish this, operator should specify LCC requirements in the early stage of acquisition and make a contractor to provide the rolling stocks of low LCC. This article presents a procedure and a verifiable LCC model available in the general acquisition process where an operator specify requirements and a contractor provide the rolling stock meeting the requirements.

Keywords : Life Cycle Cost, Acquisition, RAMS, Rolling Stock

초 록 일반적으로 철도차량의 운영·유지보수 비용은 구입비용보다 높다. 따라서 철도차량의 수명주기비용(LCC)을 낮추기 위해서는 운영 및 유지보수가 용이하고 비용이 적게 드는 차량이 설계되고, 효과적이고 효율적인 운영·유지보수 지원 시스템이 공급되어야 한다. 이를 위해서 운영사는 획득초기단계에서 LCC 요구사항을 제시하여 LCC가 낮은 철도차량이 설계되고 제작될 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서는 운영사가 차량의 구매 사양을 공고하고 제작사가 차량을 제작하여 공급하는 일반적인 차량의 획득절차에서 운영사와 제작사의 LCC 업무 및 절차를 제시한다. 또한 이 때 사용될 수 있는 검증 가능한 LCC 산출모형을 제시한다.

주요어 : 수명주기비용, 획득, RAMS, 철도차량

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

철도 운영사 관점에서 철도시스템의 수명주기비용(Life Cycle Cost : LCC)은 “철도 서비스를 제공하기 위해 이루어지는 철도시스템의 구입, 운영 및 유지보수, 폐기의 일련의 과정 속에서 발생하는 총 비용”으로 정의할 수 있다. 이와 같이 LCC는 철도 운영사가 실제 철도서비스를 제공하기 위해 소요되는 전체 비용을 나타낸다. 철도 운영의 효율성을 향상하고 고품질의 서비스를 제공하기 위해서는 철도시스템의 LCC를 예측하고 이를 기반으로 LCC를 줄일 수 있는 방안을 모색하는 것이 필요하다. IEC60300-3-3에서는 수명주기비용예측(Life Cycle Costing) 결과를 기반으로 수립할 수 있는 의사결정들로 다음과 같은 예를 제시하고 있다[1].

- 설계 및 폐기 기술 대안들의 비교 및 평가
- 프로젝트/제품의 경제적 타당성 평가
- 비용 유발인자 및 비용 효과적인 개선방안에 대한 도출
- 제품 사용, 운영, 시험, 검사, 유지보수 등에 대한 대안 전략들의 비교 및 평가

- 노후화 장비에 대한 교체, 재생 후 수명연장 또는 폐기에 대한 각기 다른 접근법들의 비교 및 평가
- 제품 개발/개선에 대한 경쟁 우선대안들에 대한 가용 자금의 분배
- 검증 시험 및 상반관계(trade-off)를 통한 제품 보증 기준의 평가
- 장기 재무 계획 수립

위와 같이 다양한 수명주기단계에서 다양한 의사결정을 통해 시스템의 LCC를 낮출 수 있다. 그러나 철도시스템과 같이 규모가 크고 복잡한 시스템은 시스템이 배치된 이후에 LCC를 줄일 수 있는 부분은 상대적으로 크지 않다. 그림 1은 SAE ARP4293에서 제시된 각 수명주기단계별 활동에 의해 발생하는 결정되는 비용과 실제 지출비용에 대한 전형적인 형태이다[2]. Fig. 1의 경우에 따르면 설계가 완료되어 개발과 유효성의 확인이 완료되는 시점에서는 LCC의 약 15% 정도가 실제로 지출되지만 LCC의 약 75%가 이미 결정된다. 즉 이 시점에서 결정된 설계의 75% 정도는 변경하기 힘들고 이들은 운영/유지보수에 가장 큰 영향을 미친다. 이것은 LCC를 줄일 수 있는 기회는 연구/개발 단계에 크고, 설계가 확정된 이후에는 상대적으로 LCC의 절감 기회가 적다는 것을 나타낸다. Fig. 1에 따르면 운영 및 유지보수 단계에서의 의사결정을 통해 절감할 수 있는 LCC의 비율은 약 5% 정도이다.

[†]교신저자 : 한국철도대학 운전기전과

E-mail : ckw1201@hanmail.net

¹한국철도기술연구원

Fig. 1은 일반적인 시스템의 경우에 대해 나타낸 것이지만 수명주기 단계가 증가됨에 따라 LCC 절감 기회가 줄어드는 추세는 철도차량에도 동일하게 적용될 것이다. 일반적으로 철도차량의 경우에는 Fig. 1의 경우보다 운영 및 유지보수 단계에서 소비되는 비용이 높다. 기존 연구에 따르면 철도차량의 경우에는 일반적으로 운영 및 유지보수비용이 획득비용의 2배 이상 차지한다.[3,4] 따라서 철도차량의 경우에는 운영/유지보수 단계에서 절감할 수 있는 LCC 비율이 Fig. 1의 경우보다는 높을 것으로 예상되지만, 운영/유지보수 활동은 차량의 설계특성에 크게 영향을 받기 때문에 그 절감 가능 비율은 여전히 제한적이다. 따라서 운영사에서는 획득단계에서부터 LCC에 영향을 주는 차량의 성능 및 특성을 관리하여 LCC가 낮은 차량이 획득될 수 있도록 해야 한다.

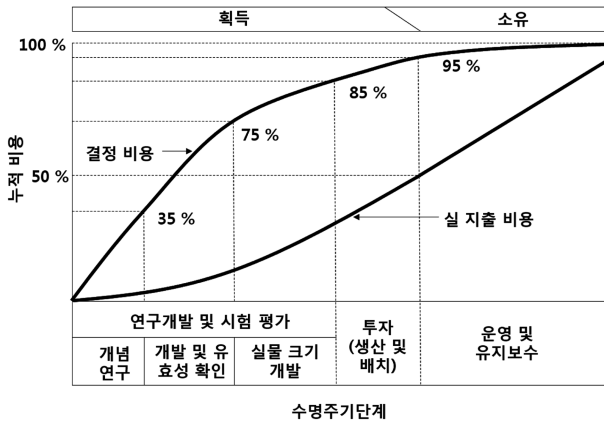


Fig. 1 Influence of decision stage on LCC

국내의 경우는 철도차량의 획득과정에서 LCC가 고려된 사례는 거의 없으며, 특히 LCC 요구사항이 제시되고 이 요구사항이 검증된 사례는 더욱 드물다. 해외의 경우에는 철도차량의 획득과정에서 LCC 요구사항이 제시되고, 이의 검증을 요구하는 사례가 점차 늘고 있는 추세이다.

철도차량을 획득하는 절차는 다양한 방법이 있을 수 있지만 본 연구에서는 운영사가 차량의 구매 사양을 공고하고, 운영사와 제작사와의 계약이 체결되고, 제작사가 차량을 제작하여 공급하는 절차를 통해 차량의 획득이 이루어지는 절차를 다룬다. 이러한 절차는 현재 국내에서 가장 일반적으로 이루어지는 철도차량의 획득절차이다.

이와 같은 철도차량의 획득과정에서 LCC를 도입하기 위해서는 이에 적합한 LCC 적용 절차 및 모형이 필요하다. 일반적인 LCC 모형은 기존 연구에서 많이 제시되었으나 기존의 모형들을 이와 같은 철도차량의 획득과정에 적용하기에는 어려움이 있다. 그 이유는 기존의 LCC 모형들은 철도차량의 특성에 따라 변화하는 LCC 요소들이 상세히 모형화 되어있지 않으며, 또한 측정 및 검증이 어려운 요소들이 모형에 포함되어 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 철도차량의 획득과정에서 적용할 수 있는 LCC 절차 및 모형을 제시하고자 한다. 2장에서는 철

도차량의 획득에 적용하기 위한 LCC 업무 절차를, 3장에서는 철도차량 획득에 적용할 수 있는 LCC 모형을 다룬다.

1.2 기존 연구

Borghagen 및 Brinkhagen은 탬핑머신(tamping machine)의 획득 프로그램에 LCC를 적용한 사례를 제시하였다[5]. 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 경우에 재설계 및 설치 후 다시 1년간의 LCC 검증을 요구하고 최종적으로 실패할 경우 위약금을 물도록 명시한 바 있다[6, 7]. 이후 LCC에 관한 사항은 유럽에서는 주요 계약조건 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 제시하고 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 제시되고 있다. 국제전기기술위원회에서는 LCC 분석을 위한 규격인 IEC60300-3-3을 제정하였으며, 유럽철도산업연합(UNIFE: Union of European Railway Industries)은 LCC 계산을 위한 모형을 제시하였다[1, 8]. 또한 EC (European Commission)의 REMAIN 프로젝트 일환으로 철도인프라 장비의 LCC 분석을 위한 REMAIN LCC 모형이 제안되었다.[9] 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[4]. Kjellsson은 철도차량 획득단계의 LCC 적용사례를 통해 LCC 관리에 필요한 요건들을 기술하였다[7].

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 입환기관차에 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[3, 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]. 이윤성 등은 자기부상열차 시스템의 수명주기비용을 계산할 때 고려해야 할 비용요소를 제안하고 사례연구의 결과를 제시하였다[15].

2. 철도차량 획득단계 LCC 업무절차

본 연구에서 다루는 철도차량 획득단계의 LCC 업무의 목적은 운영에 요구되는 차량의 성능을 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 운영사에게 높은 운영·유지보수 비용을 초래할 수 있다. 따라서 획득초기부터 운영사는 명확한 LCC 요구사항을 제시하여야 하며, 제작사는 LCC가 낮은 철도차량이 설계되고 제작될 수 있도록 노력하여야 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 시간을 단축하는 방법 등 차량의 설계 과정에 LCC를 고려하여 차량을 제작하는 것이다. 또한 LCC의 절감은 로지스틱 지원 분석(Logistic Support Analysis) 활동을 통하여 효과적이고 효율적인 운영·유지보수 정책 및 활동을 운영사에게 제공함으로써도 이루어질 수 있다. 획득단계의 LCC 업무는 제작사의 이러한 LCC 절감 활동이 이루어질 수 있도록 LCC 요구사항을 계약 요구조건으로 명시하고 이를 만족하게 하는 것이다. 각 LCC 활동은 운영사 및 제작사간의 상호 활동을 통해 이루어지며 수명 주기별 각 주체별 LCC 활동을 정리하면 Table 1과 같다.

3. 철도차량 획득단계 LCC 업무절차

3.1 LCC 모형의 개요

Table 1에서 제시한 절차에 의해 LCC가 낮은 철도차량을 획득하기 위해서는 발주자로부터 제시된 LCC 모형에 따라 하나 이상의 공급자들이 LCC를 예측하여 제시하고, 이를 바탕으로 계약이 체결되고 공급자로부터 제시된 LCC 값은 입증되어야 한다. 따라서 철도차량 획득단계에서의 LCC 모형은 차량의 특성에 따라 달라지는 실제 LCC를 묘사할 수 있어야 하며, 또한 모형에 따라 산출된 LCC 값은 입증 가능해야 한다. 본 장에서는 이러한 요구조건을 만족하는 LCC 모형을 제시한다. 먼저 운영사에서 발생하는 전체 LCC 요소를 살펴보고 LCC 요소들 중 구입하는 차량의 특성에 따라 달라지는 비용 요소를 식별한 뒤, 이를 바탕으로 입증 가능한 LCC 모형을 제시한다.

철도 운영사의 LCC는 철도 서비스를 제공하기 위한 활동들에 의해 유발되게 된다. LCC 유발 활동들은 활동의 대상이 되는 철도시스템을 구성하는 차량, 신호, 전력, 통신, 접근시설, 궤도 인프라, 로지스틱 시스템을 기준으로 구분할 수 있다. 또한 각 활동들을 그 활동의 형태에 따라 경영관리, 기술지원, 운영관리, 운영, 유지보수로 크게 구분할 수 있다.

경영관리에는 기획조정, 회계, 자재관리, 구매, 인사관리 등의 활동들이 포함되며, 기술지원에는 시스템 제작, 구매, 유지보수 관련 기술 지원업무 등이, 운영관리에는 운영 계획, 유지보수 계획 및 관리 활동 등이, 운영에는 운전 및 안전 관리 활동 등이, 유지보수에는 시스템 점검 및 정비, 공장 및 기지관리 활동 등이 포함된다.

즉 철도 운영사의 각 활동은 Table 3의 범주에 의해 구분될 수 있으며, 각 활동은 돈, 인력, 재료 등의 자원이 소비

Table 1 LCC procedure and activities

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

에 의해 비용을 유발시킨다. 운영사의 측면에서는 Table 3의 모든 범주에 속하는 모든 활동들에 의해 비용이 발생되지만, 철도차량 획득단계의 LCC 모형의 개발을 위해서는 철도차량의 특성에 따라 수행비용이 영향을 받는 활동들을 구별하여야 한다. 이와 같은 활동들의 구별과 LCC 모형을 개발을 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 가정하였다.

<가 정>

- 1) 철도차량의 구매 대안별 신호, 전력, 통신, 접근시설, 궤도인프라의 구입, 설치, 운영, 유지보수, 폐기에 이르는 비용의 차이는 무시할 수 있다.
- 2) 철도차량의 구매 대안에 대한 기술지원 비용의 차이는 무시할 수 있다.
- 3) 철도차량의 구매 대안에 대한 로지스틱 지원 설비에 대한 기술지원, 운영관리, 운영 활동 비용의 차이는 무시할 수 있다.
- 4) 이자율 및 물가상승률은 고려하지 않는다.

가정 1, 2, 3은 각 해당 활동들에 의해 유발되는 비용은 차량의 특성에 의해 영향을 받지 않는다는 가정이다. 이러한 가정은 구매 대안이 되는 차량의 특성이 크게 차이가 날 경우(예: 자기부상 차량 vs 모노레일 차량)에는 적합하지 않지만 기존 영업 노선에 투입할 차량이거나 차량 외 시스템의 특성이 이미 확정된 경우에는 차량 외 시스템의 특성에 맞는 차량이 발주되기 때문에 이러한 가정은 유효하다. 가정 4는 개발되는 LCC 모형의 단순화를 위하여 설정된 가정으로 실제 사례에 적용될 때에는 이자율 및 물가상승률은 쉽게 적용될 수 있다.

이러한 가정 하에서 철도차량 획득단계의 LCC 모형에 포함되는 활동들의 범주를 살펴보면 Table 2와 같다. Table 2를 살펴보면 신호, 전력, 통신, 접근시설, 궤도인프라에 대해 수행되는 활동은 모두 포함되지 않았다. 그 이유는 위에서 설명하였다. 그 중 궤도의 유지보수 활동비용은 차량의 중량에 따라 달라질 수 있으나, 중량의 증감에 따라 유지보수 비용의 증가를 산출하기가 어렵고 또한 현재 선로 사용 비용 또한 중량에 근거하여 부과되고 있지 않기 때문에 제외하였다. 만약 향후에 해외의 경우와 같이 국내에도 선로 사용료가 운행거리와 중량에 비례하여 부과된다면 궤도의 유지보수 활동비용 또한 LCC모형에 포함될 수 있을 것이다.

Table 2 Activities included in LCC

시스템 \ 활동	경영 관리	기술 지원	운영 관리	운영	유지 보수
차량	△	×	△	△	○
신호	×	×	×	×	×
전력	×	×	×	×	×
통신	×	×	×	×	×
접근시설	×	×	×	×	×
궤도인프라	×	×	×	×	×
로지스틱 지원 설비	△	×	×	×	○

<○ 대부분의 활동 포함, △ 일부 활동 포함 >

Table 2의 활동형태에 대한 세부 LCC유발 활동들은 도출하면 Table 3과 같다. Table 3의 활동들을 보면 경영관리 활동에는 차량과 로지스틱 지원 설비의 구매 업무만이 포함되었으며 운영관리 부분에서는 차량의 고장에 의한 손실 활동 업무만이 포함되었다. 운영 부분에는 차량의 운전 활동만이 포함되었으며 유지보수 부분에는 주요 유지보수 활동이 모두 포함되었다.

Table 3 LCC generating activities

활동형태	LCC 유발 활동
경영관리	- 차량의 구입 - 운영/유지보수 장비 및 재료 구입
운영관리	- 차량의 고장에 의한 손실 처리 활동
운영	- 차량의 운전
유지보수	- 차량의 보수정비 - 차량의 예방정비 - 유지보수 장비의 유지보수

위의 Table 3은 철도차량 획득단계의 LCC에 포함되는 세부 활동이지만 각 활동의 수행에 소요되는 모든 비용이 LCC 모형에 포함되지는 않는다. 그 예로 차량의 운전 활동을 위해서는 승무원의 인건비가 소요되지만 승무원의 수는 입찰 공고 이전 단계에서 이미 결정되는 사항이기 때문에 승무원의 인건비는 차량의 특성에 따라 달라지지 않는다. 따라서 본 연구에서 제안하는 LCC모형에는 포함하지 않았다.

이와 같이 본 연구에서 제안하는 LCC 비용분류체계(Cost Breakdown Structure: CBS)는 Table 3의 활동에 의해 유발되는 비용 중 차량의 성능 및 특성에 영향을 받는 비용만이 고려되었으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Cost Breakdown Structure

구 분	세부 LCC 요소
초기투자비용	- 차량 구입 비용 - 초기 예비품 구입 비용 - 운영·유지보수 장비 구입 비용
운영비용	- 에너지 소비 비용 - 서비스 지연에 따른 비용
유지보수비용	- 예방정비 비용 • 인건비 • 예비품/수리부품 소요비용 - 보수정비 비용 • 인건비 • 예비품/수리부품 소요비용 - 장비 유지보수 비용

결과적으로 Table 4의 CBS는 두 가지 원칙을 가지고 개발되었다. 첫째는 철도차량의 성능 및 특성에 따라 달라지는 비용요소만을 고려하였다. 그 예로 이미 언급한 바와 같이 승무원 인건비는 포함되지 않았다. 둘째, LCC 수락단계까지 검증 가능한 비용요소만을 고려하였다. 철도차량의 안전사고에 대한 손실비용은 운영사의 대표적 손실비용이지만

공급자가 제시한 안전사고 손실비용의 적합성 여부를 시스템 수락이전에 검증하는 것은 매우 어렵다. 따라서 안전사고에 대한 손실비용은 고려하지 않았다. 안전사고에 대한 손실은 안전성 요구사항으로 별도로 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.

3.2 LCC 상세 모형

철도차량 획득단계의 LCC는 다음과 같이 계산된다.

$$LCC = \text{초기투자비용}(IC) + \text{운영비용}(OC) + \text{유지보수 비용}(MC)$$

위 식에서 정의되는 LCC는 획득되는 전체 차량에 대한 비용이다. 각 비용 항목에 대한 산출 모형은 본 절에서 기술되며, 이때 사용되는 기호는 다음과 같다.

<기호정의>

- $NoTr$: 구입하는 철도차량 편성의 수
- Ptr : 구입하는 철도차량 편성의 구입단가
- $NoCSp$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 예비품 종류의 개수
- $NoCSp(i)$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i 번째 예비품의 초기 구입개수
- $PCSp(i)$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i 번째 예비품의 구입단가
- $NoCEq$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 운영 및 유지보수 장비 종류의 개수
- $NoCEq(i)$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i 번째 운영 및 유지보수 장비의 구입개수
- $PCEq(i)$: 철도차량의 도입시점에 함께 구입하는 i 번째 운영 및 유지보수 장비의 구입단가
- LT : 철도차량의 사용년한
- TRD : 철도차량 수명주기동안 편성당 총 운행거리
- UEC : 단위 운행거리당 소비되는 에너지비용
- TOT : 편성 당 연간 총 운영시간
- $MTBSF$: 편성 당 평균 서비스 고장간격(시간)
- $PCSe$: 1회 서비스지연에 대한 패널티 비용
- $MTBLF$: 편성 당 평균 로지스틱 고장간격(시간)
- $MMHCM$: 편성 당 1회 보수정비 수행에 필요한 평균인시
- $ULCCM$: 보수정비 인력의 단위시간당 임금
- $MCCM$: 편성 당 1회 보수정비에 소모되는 예비품의 평균 비용
- $NoPM$: 예방정비 종류의 개수
- $MTBM(i)$: i 번째 예방정비의 평균간격(시간)
- $MMHPM(i)$: 편성 당 대한 i 번째 예방정비 수행에 필요한 평균인시
- $ULCPM(i)$: i 번째 예방정비인력의 단위시간당 임금
- $MCPM(i)$: 편성 당 대한 i 번째 예방정비에 소모되는 예비

품의 평균 비용

- $NoEq$: 운영 및 유지보수 장비 종류의 개수
- $NoEq(i)$: i 번째 운영 및 유지보수 장비의 개수
- $YMCEq(i)$: i 번째 운영 및 유지보수 장비의 연간 유지보수 비용

위의 기호 중 MTBSF, MTBLF 정의에 사용되는 서비스 고장 및 로지스틱 고장은 Table 5의 고장범주 및 정의를 사용할 수 있다[16].

Table 5 Failure Category

고장의 범주	정 의
서비스고장	아래의 상황을 야기하는 고장 - 정의된 일정 시간 이상의 서비스 지연 - 서비스 도중의 열차의 회수 - 서비스 도중 특정한 기능이 상실되거나 해당 기능의 성능이 정의된 최소 수락 수준이하로 떨어짐
로지스틱고장	유지보수 업무가 요구되는 고장

3.2.1 초기투자비용(IC)

초기투자비용은 철도차량 구입비용($ICTr$) 및 초기 예비품 구입비용($ICSp$), 운영·유지보수 장비 구입 비용($ICEq$) 으로 구성된다.

$$IC = ICTr + ICSp + ICEq \quad (1)$$

- 차량 구입비용
구입하는 철도차량의 전체 편성에 대한 구입비용은 식(2)와 같이 계산된다.

$$ICTr = NoTr \times Ptr \quad (2)$$

- 초기 예비품 구입비용
초기 예비품은 철도차량의 유지보수에 사용되는 품목을 철도차량의 획득과 함께 구입하는 아이템이다. 초기 예비품의 구입비용은 식 (3)과 같이 계산된다. 식 (3)에서 예비품의 초기 구입개수는 LCC 뿐 아니라 차량의 운영 가용도에도 영향을 주게 된다. 따라서 예비품 수량은 LCC와 운영가용도 간의 상관관계를 고려하여 결정되어야 한다. 구체적인 예비품 수량 산정 방법은 본 논문의 범위를 벗어나므로 다루지 않는다.

$$ICSp = \sum_{i=1}^{NoCSp} NoCSp(i) \times PCSp(i) \quad (3)$$

- 초기 운영·유지보수 장비 구입비용
철도차량의 도입과 함께 구입하는 운영 및 유지보수 장비의 구입비용을 말하며 식 (4)에 의해 계산된다. 운영 및 유지보수 장비의 구입 수량 또한 LCC와 운영 가용도에 영향을 주게 되므로 이 둘의 고려하여 결정하여야 한다. 구체적인 장비 수량 산정 방법은 본 논문의 범위를 벗어나므로 다루지 않는다.

$$ICEq = \sum_{i=1}^{NoCEq} NoCEq(i) \times PCEq(i) \quad (4)$$

3.2.2 운영비용(OC)

운영비용은 철도차량의 운영시점부터 폐기시점까지 소요되는 에너지 소비 비용(EC)과 서비스 지연에 따른 비용(SDC)으로 구성된다.

$$OC = EC + SDC \quad (5)$$

- 에너지 소비 비용

에너지 소비 비용은 철도차량의 운행에 필요한 총 에너지 비용으로 식 (6)과 같이 계산된다. 식 (6) 중 UEC는 에너지 연료 구입 및 CO₂ 배출에 대한 비용 등 에너지 소비에 관련되는 비용을 포함한다.

$$EC = NoTr \times TRD \times UEC \quad (6)$$

- 서비스 지연에 따른 비용

서비스 지연비용은 식 (7)과 같이 계산된다.

$$SDC = NoTr \times \frac{TOT}{MTBSF} \times LT \times PCSe \quad (7)$$

3.2.3 유지보수비용(MC)

유지보수 비용은 보수정비 비용(CMC), 예방정비 비용(PMC), 장비 유지보수 비용(MCEq)으로 구성된다.

$$MC = CMC + PMC + MCEq \quad (8)$$

- 보수정비 비용

보수정비 비용은 차량고장을 수리하기 위해 수행되는 보수정비의해 발생하는 비용으로 식 (9)와 같이 계산된다.

$$CMC = NoTr \times \frac{TOT}{MTBLF} \times LT \times (MMHCM \times ULCCM + MCCM) \quad (9)$$

- 예방정비 비용

공급자는 차량의 고장을 예방하기 위한 예방정비 프로그램을 제공한다. 예방정비 비용은 이러한 예방정비를 수행하는 소요되는 비용으로 다음과 같이 계산된다. 단 예방정비 수행 시 발견되는 고장의 수리비용은 예방정비비용에 포함되지 않고 보수정비 비용에 포함된다.

$$PMC = NoTr \times \sum_{i=1}^{NoPM} \frac{TOT}{MTBLF} \times LT \times \{MMHCM(i) \times ULCCM(i) + MCCM(i)\} \quad (10)$$

- 장비 유지보수 비용

장비 유지보수 비용은 차량의 운영·유지보수에 필요한 장비의 유지보수 비용으로 식 (11)과 같이 계산된다.

$$MCEq = LT \times \sum_{i=1}^{NoEq} \{NoEq(i) \times YMCEq(i)\} \quad (11)$$

4. 결 론

본 연구에서는 운영사에서 수명주기비용이 낮은 철도차량을 획득하기 위한 절차 및 LCC 모형을 제시하였다. 제시된 LCC 모형에는 철도차량의 성능 및 특성에 따라 달라지며, 검증 가능한 비용요소만이 고려되었다. 이와 같이 공급자가 책임져야 하고 검증 가능한 LCC 모형의 적용을 통해 철도차량의 설계 단계에서부터 LCC가 고려될 수 있을 것이다. 추후 연구 문제로는 LCC 요구조건 또는 계약사항을 어떻게 검증할 것인가의 문제가 있다. 이 문제 또한 LCC를 철도차량 획득에 적용하기 위해서 반드시 해결되어야 할 문제이다.

본 연구에서 제시된 LCC 모형은 많은 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety) 성능 파라미터로 구성되어 있다. 즉 제시된 LCC모형에 따라 LCC 비용을 낮추기 위해서는 효과적인 RAMS 활동의 수행이 요구된다. 따라서 LCC 를 적용하기 위해서는 이에 적합한 RAMS 활동 또한 수행하는 것이 반드시 필요하다. 이러한 두 활동을 통해 안전성 및 신뢰성이 높으면서도 수명주기비용이 저렴한 철도차량의 획득이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 “도시철도 표준화 2단계 연구개발 사업”에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] IEC 60300-3-3 (2004) *Application Guide for Life Cycle Costing*, IEC International Standard.
- [2] SAE ARP 4293, 4294 *Aerospace Recommended Practice (1992) Life Cycle Cost Techniques and Applications*, USA Standard.
- [3] H.K. Jun, J.H. Kim, J.W. Kim, J.S. Park (2007) A basic study on the development of life cycle cost estimation model of magnetic levitation train, *2007 Spring Conference of Korean Society for Railway*, pp. 76-83.
- [4] J. Stern (1994) Life cycle cost : A method for reducing costs and improving railway vehicles, *Proceedings of World Congress Railroad Research*, pp. 661-666.
- [5] L. Borghagen and L. Brinkhagen (1984) LCC-Procurement at the Swedish state railways, *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 349-358.
- [6] 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.
- [7] U. Kjellsson (1999) From X2000 to crusaris regina : Development of LCC technology, *Proceedings of World Congress Railroad Research*, pp. 1-7.
- [8] UNIFE LCC Group (1997) *Guidelines for Life Cycle Cost*, Union of European Railway Industry.
- [9] P. Hokstad (1998) *Life Cycle Cost Analysis in Railway Sys-*

tems, SINTEF Industrial Management.

- [10] J.M. Kim, P.H. Lee, J.K. Lee (2002) Investigation into life cycle cost of Electric Multiple Unit (EMU), *2002 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp 396-407.
- [11] J.D. Chung, D.S. Bae (2005) Life-cost-cycle evaluation analysis of the shunting locomotive, *Journal The Korean Society for Railway*, 8(3), pp. 260-266.
- [12] H.K. Jun, J.H. Kim, J.W. Kim, J.S. Park (2007) Development of life cycle cost estimation software on the aspect of maintenance strategy, *2007 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 773- 779.
- [13] J.H. Kim, H.K. Jun, J.S. Park, H.Y. Jeong (2009) A study on the life cycle cost calculation of the railroad vehicle based on the maintenance information, *Journal The Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 88-94.
- [14] K.W. Chung, C.S. Kim, S.H. An, Y.S. Jun, J.M. Kim, S.Y. Han (2008) A study on the application of life cycle cost analysis for the urban transit vehicle, *2008 Spring Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 715-726.
- [15] Y.S. Lee, L.O. Kim, H.C. Kim, D.U. Jang (2009) A study on modeling of life cycle cost for magnetic levitation train *Journal The Korean Society for Railway*, 12(6), pp. 1076-1080.
- [16] I.S. Chung, K.W. Lee, J.W. Kim (2008) A study on RAMS parameters in the procurement requirement for rolling stock, *Journal The Korean Society for Railway*, 11(4), pp. 371-377.

접수일(2010년 3월 29일), 게재확정일(2010년 5월 10일)