

유지보수관점에서의 수명주기비용예측 소프트웨어 개발

Development of Life Cycle Cost Estimation Software on the Aspect of Maintenance Strategies

전현규* 김재훈** 김종운** 박준서**
Jun, Hyun Kyu Kim, Jae Hoon Kim, Jong Woon Park, Jun Seo

ABSTRACT

Life cycle costing is one of the most effective cost approaches when we choose a solution from series of alternative so the least long-term cost ownership is achieved. Life cycle costing in railway industry has been focused on the prediction of investment for railway vehicles. But in today, the life cycle cost, LCC, prediction on the aspect of operation and maintenance cost through whole life cycle is highly necessary.

In this paper, we present a strategy for the development of life cycle cost estimation software on the aspect of maintenance strategies of railway vehicle. For this purpose, we suggested a structure of LCC software based on the UNIFE LCC model. And we developed a pilot version of software to evaluate the LCC model that we suggested for railway vehicle. We performed LCC analysis on the brake module of metro vehicle in case study and concluded that the software and model developed in this research could enough to support engineers in choosing better cost effective solutions from many alternatives.

1. 서론

수명주기비용(이후 LCC)은 제품개발, 제조, 운영 및 유지보수, 폐기에 이르기까지 소요되는 모든 비용을 포괄하며 이를 위해서는 신뢰성(reliability), 가용성(availability), 유지보수성(maintainability), 경제성(economic) 및 위험성(risk) 해석 등이 고려된 종합적인 해석이 수반되어야 한다. LCC는 대안(alternative)에 대한 평가 및 비교, 경제적으로 유리한 조건의 판단, 기존 시스템의 교체 또는 수명연장 등을 결정하기 위하여 적용되며, 미래의 재정계획을 세우기 위한 기초 데이터로 이용되는 등 여러 가지 목적에 의해 수행되고 있다. LCC의 개념은 1970년대 미국 국방부로부터 최초로 적용되기 시작하였으며, 그 후 발전설비 및 대형 화학플랜트 산업에 적용되었다. 1990년대에 들어서는 철도시스템 등 대형 SOC(Social Overhead Capital) 산업에 적용되고 있다.

철도분야 LCC 예측에 관한 연구는 상대적으로 유럽에서 활발하게 이루어지고 있다. 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission : IEC)는 LCC 예측을 위한 국제규격, "IEC 60300-3-3:Life cycle costing"⁽¹⁾을 제정하였으며, 유럽 전역을 하나의 시장으로 구축하려는 노력 하에 1991년 결성된 UNIFE(Union of European Railway Industries)⁽²⁾에서는 LCC를 계산하기 위한 모델을 개발하고 이를 Excel로 프로그램화(unilife, unidata)하여 배포하고 있다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부
E-mail : hkjun@krri.re.kr
Tel. : 031-460-5228

LCC 예측은 예측범위에 따라 수많은 계산절차를 반복하므로 수작업으로 수행하기는 어려우며 컴퓨터를 이용한 소프트웨어들이 개발되고 있다. 지금까지 수많은 LCC 예측 소프트웨어가 개발되고 있으며, 예측목적에 따라 자사의 고유한 모델을 가지고 있다. 현재, 상업용 소프트웨어로는 SEER⁽³⁾, PRICE, Relex-LCC⁽⁴⁾ 등이 있다. SEER와 PRICE는 대표적인 원가산정 소프트웨어로 자체 데이터베이스에 개발비, 양산비 등을 예측할 수 있는 추정식이 수록되어 있으며 적정 예비품 수량을 계산할 수 있는 기능도 있으나 LCC 모형의 변경이 거의 불가능하며 국방분야의 LCC 모델 위주로 개발되어 철도분야에 적용하기에 적절치 않은 점이 있다. Relex-LCC는 모형의 유연성이 높아 사용자가 높은 수준의 커스터마이징을 할 수 있으나 복잡한 LCC 모형을 구축하기 위해서는 숙련된 기술이 필요하다. 비교적 단순한 프로그램으로는 UNIFE에서 개발한 unilife가 있으나 이는 Excel 로 작성되어 있으므로 이를 이용하기 위해서는 사용자가 LCC 계산절차에 대한 깊은 지식이 필요하며 고장율 등 확률분포로 계산해야하는 파라미터를 처리하지 못하는 등 실용적 측면에서는 한계가 있다. 또한 시스템 특성 및 운영환경의 변화를 적절하게 반영하기 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 유지보수 관점에서의 LCC 계산을 위한 소프트웨어 개발전략을 수립하였으며 파일럿 버전의 LCC 예측소프트웨어를 개발하였다. 본 논문에서는 이를 위한 소프트웨어 구조 및 개발전략과 개발된 소프트웨어의 구성에 대해 설명하였다. 또한 개발된 소프트웨어를 이용하여 전동차 브레이크 모듈에 대해 수행한 사례연구에 대해 설명하였으며, 해석결과를 이용한 대안 선택전략에 대해 설명하였다.

2. LCC 소프트웨어 개발

2.1 목적 및 범위

본 연구에서 개발하고자 하는 소프트웨어는 운영 및 유지보수 측면에서의 전략생성시 여러 가지의 대안에 대해 비용적인 측면에서의 최적인 도출을 위한 의사결정을 지원하기 위한 것으로 UNIFE의 LCC 모형을 기반으로 하며 unilife에서 수작업으로 수행해야 하는 부분을 자동화하고, 앞서 논문⁽⁵⁾에서 발표한 철도차량 LCC 예측 모형을 소프트웨어로 개발함으로써 LCC 예측의 효율화를 달성하고자 하였다. 아직까지 LCC 모형의 한계성 및 비용데이터의 부정확성으로 인하여 총수명주기동안의 비용을 정확히 정량적으로 예측하기는 불가능하므로 소프트웨어의 개발목적을 실제와 유사한 비용예측을 목적으로 하는 대신 동일 환경에서 어떠한 대안이 더 유리한지 평가하기 위한 대안평가로 설정하였다. 그러나 추후 모델이 개선되고 데이터의 정확성이 높아지면 보다 현실상황과 유사한 비용데이터를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 LCC 예측 모델

본 연구에서 제시한 철도차량시스템의 LCC 모델은 시스템 도입비(investment cost), 운영비(annual operation cost), 유지보수비(annual maintenance cost) 및 폐기비(disposal cost)로 구성하였으며 앞서 발표⁽⁵⁾한 논문에서 자세하게 설명하였다.

$$LCC = \text{시스템 도입비} + \text{운영비} + \text{유지보수비} + \text{폐기비} \quad (1)$$

LCC 예측모델개발을 위한 정의 및 가정은 다음과 같다. 시스템 도입비용은 열차시스템을 구성하는 각각의 시스템에 대한 초기구입비용 및 이를 운영하기 위해 필요한 하드웨어 및 소프트웨어 비용으로 장비비, 교육훈련비 및 문서화비 등의 합으로 구성하였다. 구입비는 시스템을 구축하기 위한 초기 도입

비로 본 모델에서는 시스템 개발을 위한 설계비, 연구개발비 등 개발과정에서의 원가는 계산하지 않고 최종 결과물의 도입에 필요한 비용만을 고려하였다. 장비비는 시스템을 유지하기 위하여 정비장에서 필요한 장비들의 총 구입 및 설치비용으로 장비의 종류에 따른 수량과 구입비용의 곱으로 계산하였다. 예비품비는 시스템에 요구되는 가용성을 유지하기 위하여 초기 도입되는 예비품에 대한 비용으로 각 예비품에 대한 수량과 가격의 곱으로 계산하였다. 예비품 계산의 범위는 철도차량의 PBS(Product Breakdown Structure)를 기반으로 하여 LRU(Line Replaceable Unit) 단위까지 구조를 확장한 후 이를 기반으로 예비품 구조를 결정하도록 하였다. 교육비는 시스템을 운영하기 위하여 필요한 각종 교육에 필요한 비용으로 기관사 양성교육비, 승무원 교육비, 역무원 교육비 등으로 구성하였으며, 문서화비는 시스템의 도입 및 운영을 위해 필요한 각종 문서를 생산하는 비용으로 장비 및 운영에 대한 원어(original language)문서비용, 번역비용, 예비품 카다로그비용, 문제해결 매뉴얼(troubleshooting manual)비용, 도면화(drawing)비용, 전산화비용 등으로 구성하였다. 한편 운영비는 열차시스템을 운영하기 위한 에너지 사용료로만 한정하여 계산하였으며, 시스템의 유지보수를 위한 비용은 크게 예방정비를 위한 비용, 고장정비를 위한 비용으로 계산하였다. 예방정비 및 고장정비 비용은 각각 정비를 위해 소요되는 인력의 인건비와 재료비로 분류하여 계산하였다.

2.3 LCC 소프트웨어 구조

그림 1은 LCC 소프트웨어의 기능블럭도로써 크게 프로젝트 정의, CBS(Cost Breakdown Structure) 구조작성, LCC 계산, 결과출력 및 비용프로파일 생성의 4단계로써 진행된다. 1단계, 프로젝트 정의단계에서는 LCC를 계산하고자 하는 시스템(편성, 편성당 차량수, 연간 운행거리, 수명주기 등) 및 운영환경(예방정비 주기, 인시비, 인플레이션 등)에 대한 기초적인 자료의 정의함으로써 전체적으로 비용예측을 위한 기본시나리오를 정의한다. 2단계, CBS 구조작성 단계에서는 각각의 철도시스템에 맞게 소프트웨어에서 제공한 템플릿(template)을 이용하여 사용자의 요구에 맞는 CBS 구조를 작성한다.

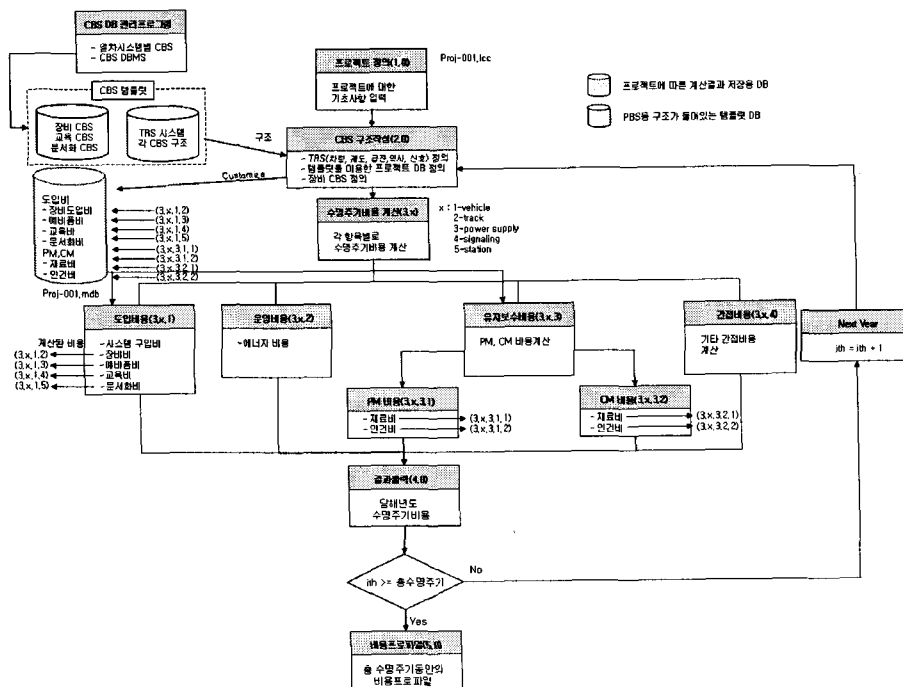


그림 1 LCC 소프트웨어 기능블럭도

CBS 구조는 사용자가 얼마나 정확한 데이터를 확보할 수 있고 비용예측을 위해 얼마나 많은 시간을 투자할 수 있는지에 따라 달라진다. 즉 CBS의 레벨을 얼마나 낮은 단계까지 비용트리를 확장할 수 있는냐 하는 것으로 주어진 환경에 따라 사용자가 결정해야 하는 몫이다. 그러나 너무 낮은 단계의 CBS 수준을 설정하면 데이터 확보에 어려움을 겪을 수도 있다. 3단계는 LCC 비용을 계산하는 단계로 연간 도입비, 운영비, 유지보수비를 계산하고 이를 총수명주기동안 합산한다. 4단계는 예측된 LCC의 출력 및 수명주기까지의 년차별 비용프로파일을 출력하는 단계로 비용측면에서 유리한 대안을 결정할 수 있도록 지원하는 단계이다.

2.4 LCC 데이터베이스 구조

그림 2는 데이터베이스의 구성도로써 LCC 계산을 위해서는 여러 가지의 데이터가 필요하므로 이를 원활히 관리하기 위해 데이터베이스를 구성하였다. 데이터베이스는 MS Access를 이용하였으며 LCC 계산을 위해 필요한 파라미터 중 차량의 PBS에 따라 반복적으로 계산해야 하는 파라미터들을 데이터베이스화 하였다. LCC DB는 자기부상열차시스템에 적합하도록 캘리브레이션된 CBS 데이터를 저장하고 있다. 사용자가 CBS 구조작성 단계에서 이를 불러들여 활용할 수 있도록 지원하였다. 이때 사용자는 수명비용 데이터의 확보여부에 따라 시스템이 제공하는 CBS 구조를 적절하게 수정하여 사용자에게 맞는 고유의 CBS 구조를 생성할 수 있으며, DB에 사용자가 입력한 비용데이터를 저장함으로써 향후 이를 활용할 수 있도록 하였다. LCC DB는 아래와 같이 크게 7개의 테이블로 구성되어 있으며 PBS 기반으로 서로 연계되어 있다.

- PBS 테이블 : 시스템에서 제공한 템플릿 PBS를 바탕으로 사용자의 요구에 맞는 PBS 구성 후 저장
- Equipments 테이블 : 각종 장비의 수량 및 가격에 대한 정보를 저장
- Training 테이블 : 교육 및 훈련 종류 및 비용에 대한 정보를 저장
- Documentation 테이블 : 문서화를 위한 리스트 및 비용에 대한 정보를 저장
- Spare 테이블 : PBS 트리구조에 맞게 예비품 수량 및 비용에 대한 정보를 저장
- PM 테이블 : PBS 트리구조에 맞게 일상, 월상, 주요부 및 전반검수에 대한 정보를 저장
- CM 테이블 : PBS 트리구조에 맞게 고장율, 부품교체횟수, 정비소요시간 등에 대한 정보를 저장

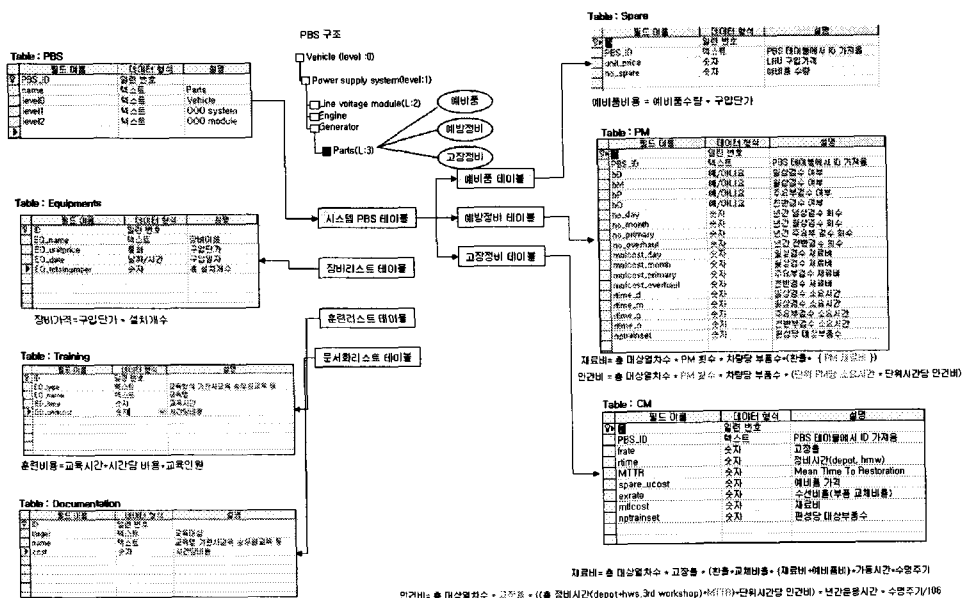


그림 2 LCC 예측을 위한 데이터베이스 구조

2.5 LCC 소프트웨어 개발

그림 3은 소프트웨어의 메뉴구조로서 그림 1의 블록기능도의 절차와 같이 프로젝트 정의, CBS 구조작성, 비용산출 및 결과출력 메뉴로 구성하였으며, 특히 비용산출을 위한 모듈은 Visual C++를 이용한 클래스(class) 형태로 개발함으로써 본 소프트웨어뿐만 아니라 타 프로젝트에서도 쉽게 이용할 수 있도록 하였다.

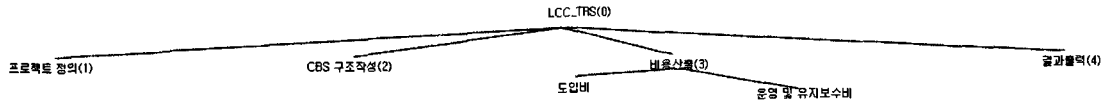


그림 3 LCC 소프트웨어 스트럭처

3. 사례연구

3.1 문제정의

본 연구에서 개발한 LCC 프로그램의 효율성을 입증하기 위해 도시철도 차량의 브레이크 모듈 중 브레이크 디스크와 브레이크 패드의 교환에 따른 LCC를 예측하였다. 해석에 필요한 데이터는 문헌조사 및 현장방문을 통한 실사를 통해 입수하였으나 LCC 예측에 필요한 모든 데이터는 확보할 수 없었으며 일부 데이터는 적절한 수준으로 가정하여 사용하였다. 사례연구에 사용된 브레이크 시스템은 제어장치, 벨브, 마찰 브레이크, 공기압축기 및 탱크 모듈 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 브레이크 시스템 전체에 대해 LCC 예측하는 것은 비용데이터의 확보 등 많은 작업이 소요되기 때문에 어렵다고 판단하여 마찰브레이크 모듈 중 반복적인 유지보수비용이 발생하는 디스크와 패드에 대해서만 수명주기 동안 소요되는 비용을 예측하였다.

도시철도 전동차의 차량은 8량의 차량들이 1편성을 구성하는 것으로 가정하였으며 각 차량은 4개의 브레이크 디스크와 8개의 브레이크 패드가 있으므로 1편성에는 총 32개의 브레이크 디스크와 64개의 브레이크 패드가 있다고 가정하였다. 표 1은 해석을 위한 시스템의 개요이다. 시간당 인건비는 9,300원/hour으로 가정하였으며, 1라인에 총 72편성의 열차가 운행된다고 가정하였다. 편성당 총 연간운행거리는 130,000km/year로 가정하였으며 할인율은 4%를 적용하였다. 총수명주기는 25년이며 총 수명기간동안 3,250,000km를 운행한다고 가정하였다. 디스크 브레이크의 개당 가격은 약 300,000원으로 가정하였으며 브레이크 패드의 개당 가격은 약 15,000원으로 가정하였다. 브레이크 디스크의 고장률은 0.3081 fpmkm이며 브레이크 패드의 고장률은 16.710 fpmkm이다. 즉 브레이크 디스크의 경우 100만km당 0.3회 고장을 일으키며 브레이크 패드의 경우 16.7회 고장을 일으킨다.

예방정비검사 주기는 크게 4가지, 3일마다의 일상검사, 40,000km 마다의 월상검사, 400,000km 마다의 주요부 검사 및 800,000km 마다의 전반부 검사로 정의하였으며 각 검수시 소요되는 시간 및 비용은 현장조사 데이터를 바탕으로 정의하였다. 일상, 월상, 주요부 및 전반부 검수시 수행되는 브레이크 디스크와 패드에 대한 유지보수작업에 소요되는 재료비와 시간은 표 2와 같이 가정하였다. 이 값은 실제 정비기술자의 숙련도, 작업속도, 고장모드 등 다양한 형태로 정의되어 실제 작업을 수행함으로써 측정되는 값을 기준으로 해야 하나 앞서 언급한바와 같이 본 사례연구에서는 모델의 정확성과 DB 체계의 검토를 위한 것이므로 데이터의 정확성은 깊이 고려하지 않았다.

한편 고장정비검사 주기는 고장률을 기반으로 누적운행거리가 고장률에 도달할 때 부품에 고장이 발생하고 이를 교체한다고 정의하였으며, 누적운행거리와 고장률의 관계로부터 고장정비검사 주기를 산출하였으며 정비 및 시험에 소요되는 시간과 비용은 현장데이터를 바탕으로 일부 가정된 데이터를 사용하였다.

표 1 LCC 비용예측을 위한 시스템 개요

항 목	값(1\$=930원)
Man hour cost/hour	\$ 10/hour
Number of train-set in the fleet	76 train-set
Operating distance	130,000km/year
Discount rate	4%
Life cycle	25 years
Covered distance through whole life	3,250,000km
Unit price of brake disk	\$320
Unit price of brake pad	\$16
Failure rate of brake disk	3.0810^{-7} FPMKM*
Failure rate of brake pad	1.6710^{-5} FPMKM
Man hour	1manh
MTTR**	0.5h

* FPMKM : failure per million kilometer [$f/10^6$ km]

**MTTR : mean time to restoration [hour]

시스템의 도입단계에서 발생하는 도입비는 76편성에 필요한 총 브레이크 디스크와 패드의 구입비로 가정하였으며, 초기 예비품은 1편성의 열차를 구성하기 위해 소요되는 부품에 대한 비용으로 가정하였다. 따라서 1편성의 차량을 구성하기 위하여 32개의 브레이크 디스크와 64개의 브레이크 패드가 있으므로 이들의 총 가격을 단순히 예비품가격으로 가정하였다. 장비비는 브레이크 모듈을 수리하는데 필요한 장비가격으로 정의하였으며 훈련비는 브레이크 모듈의 검수 및 수리를 위해 필요한 교육비로 정의하였다. 브레이크 디스크 수리훈련은 1인당 0.5시간이 소요된다고 가정하였으며 비용은 시간당 9,300원/hour 이 소요된다고 가정하였다. 따라서 5명이 브레이크 디스크 수리훈련을 받을 때의 훈련비용은 0.5시간 × 9,300원 × 5인으로 계산할 수 있다.

표 2 유지보수비용 예측을 위한 입력파라미터

검수항목	예방정비주기	예방정비 재료비(\$/개)	소요시간 (h/개)	고장정비시간 (h/개)	고장정비 재료비(개/\$)
브레이크 디스크	3일	0.05	0.05	0.5	0.5
	40,000km	0.50	0.10		
	400,000km	1.00	0.50		
	800,000km	5.00	1.00		
브레이크 패드	3일	0.05	0.05	0.1	0.5
	40,000km	0.50	0.10		
	400,000km	1.00	0.50		
	800,000km	5.00	1.00		

3.2 LCC 예측결과

그림 4는 브레이크 모듈과 디스크의 LCC 예측결과이다. LCC 예측시 일부 가정된 값이 사용되었기 때문에 그림 4에서 나타내는 비용이 실제 소요되는 비용과 다소 차이가 있을 수 있으나 추후 비용분석을 통해 현실적인 값을 입력하게 되면 예측의 신뢰도를 좀 더 높일 수 있을 것으로 생각된다. 그림 4(a)의 예방정비비 경우 수명주기에 따라 주요부 검사 및 전반검사가 도래하는 시기에 비용이 증가하는 것을 볼 수 있으며 고장정비의 경우 시간에 따라 고장률이 일정하다고 가정했기에 매년 일정한 고장정비비가 소요됨을 알 수 있다. 브레이크 모듈의 누적수명주기비용은 그림 4(b)와 같이 선형적으로 증가하였으며 초기 도입비에 비해 약 4-5배의 유지보수비가 소요됨을 알 수 있다.

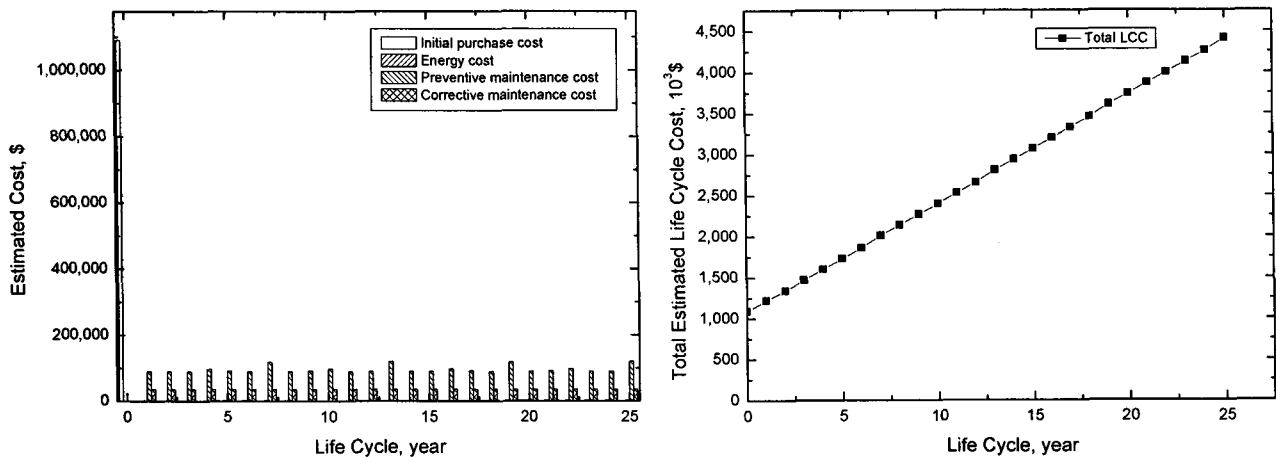


그림 4 수명주기비용 예측결과

4. 토의 및 향후연구계획

수명주기비용의 정확한 예측을 위해서는 적절한 LCC 예측모델을 개발하는 것도 중요하나 타당한 입력데이터를 확보하는 것 또한 매우 중요하다. 그러나 사례연구를 수행하는 과정에서 국내의 경우 아직까지 LCC 예측을 위한 데이터가 준비되지 않았음을 확인할 수 있었으며 이를 위한 데이터의 확보가 선행되어야 하는 중요한 일로 생각되었다. 본 연구에서는 유지보수비용 예측에 중점을 둔 LCC 예측 소프트웨어를 개발하였으며 본 논문에서는 이를 위한 전략 및 개발된 소프트웨어에 대해 설명하였다. 또한 개발된 소프트웨어를 이용하여 수행한 전동차 브레이크 모듈의 LCC를 예측하는 사례연구에 대해 설명하였다. 그러나 아직까지 실제와 유사한 비용예측을 위해서는 지속적인 모델의 개선 및 소프트웨어의 업그레이드가 요구된다.

현재의 모델에서는 고장률 등 시간 의존적 또는 산술분포가 필요한 파라미터에 대해 결정적 값으로 정의하였으나 향후에는 산술분포 등을 도입함으로써 어떠한 비용이 전체 수명주기비용에 어떻게 작용하는 지 분석할 수 있는 소프트웨어로 발전시키고자 한다.

후 기

본 연구는 “자기부상열차실용화 사업”의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] IEC 60300-3-3, 2004, “Application guide - Life cycle costing”, IEC International Standards.
- [2] UNIFE LCC group, 1997, “Guidelines for Life Cycle Cost Volume I~IV”, <http://www.unife.org>
- [3] 이철우, 2006, “시스템 수명주기비용추정 실무-SEER Operation & Support Cost”, 시스템체계공학원
- [4] Relex, 2007, “Relex reliability studio reference manual”,
- [5] 전현규, 김재훈, 김종운, 박준서, 1997, “자기부상열차 수명주기비용모델 개발을 위한 기초연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.