

자기부상열차 수명주기비용모델 개발을 위한 기초연구

A Basic Study on the Development of Life Cycle Cost Estimation Model of Magnetic Levitation Train

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

ABSTRACT

To get competitiveness in international markets, it is essential to provide low acquisition, maintenance and operation cost with high reliability, availability and maintainability. It can be achieved by lowering development cost, making proper maintenance planning and scheduling strategies, allocating man power and logistic cost properly.

In this paper, we introduces the research on making a model for estimating the life cycle cost of newly developing magnetic levitation train system in Korea. To develop a proper life cycle cost model, we broadly analyzed specs and standards and compared the life cycle cost model developed in other country. Finally, we suggests strategies to develop an unique model for the magnetic levitation train system developing in Korea.

1. 서론

철도시스템의 경우 차량, 전기, 신호 등 다양한 시스템이 복잡하고 유기적으로 연결된 대형시스템으로 제한된 물적, 인적 자원을 투입하여 요구되는 성능을 달성하며 총소유비용(ownership cost)은 낮추는 문제에 늘 당면하고 있다. 따라서 시스템의 정확한 수명주기비용(life cycle cost : LCC) 모델의 수립 및 예측을 통하여 제한된 자원을 전략적으로 분배할 필요성이 있다. 일반적으로 철도시스템과 같은 대형시스템의 경우, 시스템 도입비용(15~20%)보다 폐기시까지의 총소유비용(75~80%)이 훨씬 큰 특징이 있으므로 단순히 도입비용을 기준으로 하기 보다는 전체적인 라이프사이클 측면에 의하여 자원을 분배하는 것이 더더욱 중요하다.



그림 1 총수명주기비용의 구성

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

RAM/LCC 요구사항이 포함된 최초의 중요한 계약은 1986년 Adtranz(구 ABB)사와 SJ(Swedish State Railway)간에 이루어진 스위스 고속철도 X2000⁽¹⁾에 대한 것으로 이 계약에서는 프로젝트 기간과 상업운전 개시 후 1년 동안의 RAM/LCC 검증을 요구하였으며 요건을 충족하지 못할 경우에 재설계 및 설치후 다시 1년간의 RAM/LCC 검증을 요구하고 최종적으로 실패할 경우 위약금을 물도록 명시한 바 있다. 이후 RAM/LCC 에 관한 사항은 유럽에서는 주요 계약요건중 하나로 요구되고 있다⁽²⁾.

한편, 국외 철도산업⁽³⁾에서는 차량제작사는 차량공급만을 책임지고 운영처가 운영 및 유지보수를 책임지던 과거의 체제와는 달리 운영처에서는 운영만을 담당하고 차량제작 및 유지보수작업은 차량제작사에서 담당하는 체계로 산업구조가 변화하고 있다. 유지보수작업을 운영처에서 제작사로 이관하면 철도시스템의 유지보수를 수행하기 위해 필요한 장비 및 작업요원을 운영해야 하는 짐으로부터 벗어날 수 있으며, 제작사에 차량 및 철도시스템에서 발생하는 각종 고장 및 장애에 대한 책임을 이관할 수 있다. 한편, 제작사는 유지보수를 책임져야 하므로 시스템의 신뢰성 및 가용성 확보를 위한 다양한 노력을 수행할 것으로 예측되며 유지보수 계약기간에 안정적인 수입이 보장되므로 궁극적으로 철도시스템의 안정화에 기여할 것으로 생각된다. 이러한 장점 때문에 운영과 유지보수의 분리현상은 가속화될 것으로 판단되나 이는 경제성의 원칙을 바탕으로 하기 때문에 시스템 전체수명기간에 대한 정확한 수명주기비용의 예측이 필수적이다. 이를 위하여 유럽에서는 IEC 60300-3-3규격⁽⁴⁾을 제정하고 산·학·연이 협력하여 REMAIN, PROMAIN, UNIFE⁽⁵⁾ 등 다양한 연구활동이 수행되었고 현재도 수행되고 있다.

국내의 경우에는 상대적으로 RAM/LCC의 도입 및 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 박⁽⁶⁾ 등은 국외 전동차 수명주기비용 연구동향을 소개함으로써 수요자의 요구와 국제 규격에 대응하기 위한 전략을 소개한 바 있으며, 정⁽⁷⁾ 등은 입환기관차의 LCC 분석을 통하여 노후된 차량을 수리하여 운영했을 경우와 신규차량을 도입하여 운행했을 경우에 대한 경제성 분석을 수행한 바 있다. 그러나 아직까지 국내에서는 발주사양에 LCC 요구조건이 포함되거나 체계적으로 LCC 연구가 수행된 바 없다.

본 논문에서는 철도선진국의 LCC 기술동향에 대해 분석하고 타기관의 자기부상열차시스템에 대한 LCC 연구동향을 분석함으로써 국내에서 개발되고 있는 자기부상열차시스템에 적합한 LCC 모델 개발을 위한 전략에 대해 소개하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 수명주기비용

수명주기비용⁽⁶⁾은 제품개발, 제조, 운영 및 유지보수, 폐기에 이르기까지에 소요되는 모든 비용을 의미하며 이를 위해서는 신뢰성(reliability), 가용성(availability), 유지보수성(maintainability), 경제성(economic) 및 위험성(risk) 해석 등 종합적인 해석이 수반되어야 한다. 수명주기비용은 대안(alternative)에 대한 평가 및 비교, 경제적으로 유리한 조건의 판단, 기존 시스템의 대체 또는 수명연장등을 결정하기 위하여 적용되며, 미래의 재정계획을 세우기 위한 기초 데이터로도 이용할 수 있다. 수명주기비용의 개념은 1970년대 미국 국방부로부터 최초로 적용되기 시작하였으며, 그 후 발전설비 및 대형 화학플랜트 산업에 적용되고 있다. 1990년대에 들어서는 철도시스템 등 대형 SOC(Social Overhead Capital) 산업에 적용되고 있다.

제품의 기획부터 설계, 제조, 설치, 운영 및 폐기단계까지 필요한 비용은 그림 2와 같다. 기획단계에서의 비용은 새로운 제품에 대한 기회비용, 제품선정, 기술선정 또는 내부에서 개발할 것인가 외부에서 사울 것인가 등에 대한 전략, 각각의 비용요소에 대한 분석, 제조가능성 평가 등 다양한 전략을 수립하는데 필요한 비용으로 구성되며, 설계, 개발, 제조 및 설치단계에서의 비용은 설계전략, 소스선택, 사양

및 변경 컨트롤, 시험, 보수, 성능평가, 시스템 통합 및 설치 등을 수행하는데 필요한 비용으로 구성된다. 운영 및 유지보수단계에서는 시스템 시험운영 및 검증, 상업운영 및 유지보수 모니터링, 제품수정, 유지보수를 위한 자원분배 및 최적화 등을 수행하는데 필요한 비용으로 구성되며, 폐기 단계에서는 폐기에 따른 비용효과, 대체 또는 리모델링에 따른 전략 및 폐기에 필요한 비용으로 구성된다. 일반적으로 기획부터 설치까지의 비용을 개발비용 또는 도입비용(acquisition cost)으로 정의하며 이후 운영, 유지보수 및 폐기에 이르는 비용을 소유비용(ownership cost)으로 정의한다.

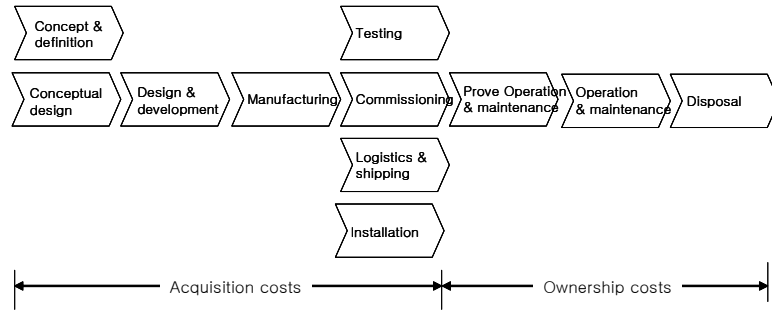


그림 2 전 수명단계에서의 비용요소

2.2 관련규격 및 연구동향

철도시스템 수명주기비용에 대한 국제규격은 IEC 60300-3-3⁽⁴⁾이 있으며 총수명주기비용을 도입비, 소유비 및 폐기비용의 합으로 정의하고 있다.

$$LCC = Cost_{acquisition} + Cost_{ownership} + Cost_{disposal} \tag{1}$$

IEC에서는 비용을 발생시키는 주요 수명단계를 개념정의, 설계 및 개발, 제조, 설치, 운영유지 및 폐기의 여섯 단계로 정의하였으며 단계별 비용요소(cost element)를 그림 3과 같이 매트릭스 형태로 전개하고 각 비용요소가 단계별 비용요소에 기여하는 비용을 모두 더함으로써 전체 수명주기비용을 계산하고 있다.

$$LCC = \sum_k \sum_i \sum_j C_{jik} \tag{2}$$

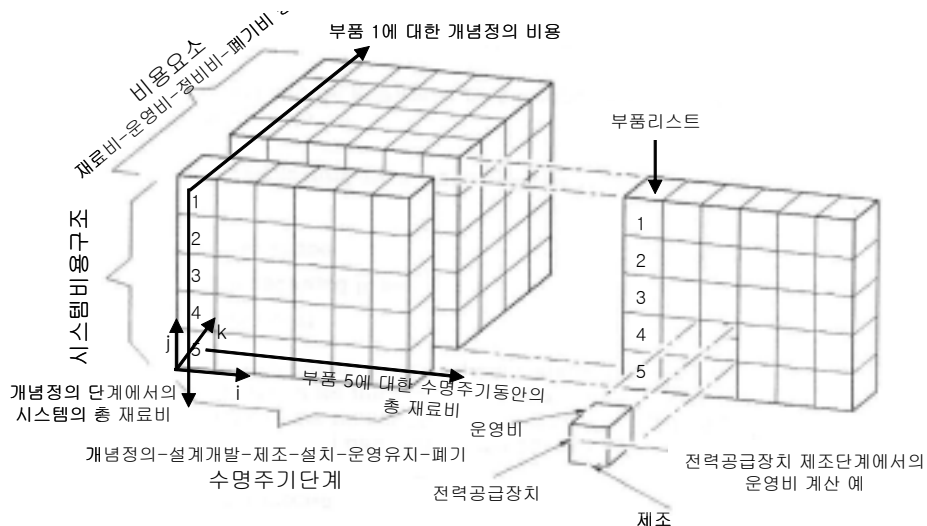


그림 3 IEC 60300-3-3 수명주기비용모델⁽⁴⁾

UNIFE(Union of European Railway Industries)⁽⁵⁾는 유럽 전역을 하나의 시장으로 구축하려는 노력 하에 AICMR, AFEDF 및 CELTE를 대표하여 1991년 결성되었다. 당시 약 60여개의 철도관련회사 회원사가 참여하였으며 현재에는 16개국 약 900여 철도관련회사가 참여하고 있다. UNIFE-LCC 그룹에서는 LCC 요구사항에 대한 수명주기비용을 계산하기 위한 모델을 개발하고 이를 Excel로 프로그램화 (UNILIFE, UNIDATA)하여 배포하고 있으며 유럽연합에서는 이를 기준으로 수명주기비용을 계산하고 평가하고 있다. UNIFE의 LCC도 도입비(investment), 운영비(yearly cost) 및 유지보수비(life support cost : LSC)의 합으로 계산한다.

2.3 철도시스템 수명주기비용 모델

이와 같이 철도시스템의 경우 수명주기비용은 크게 도입 및 시설투자(facility investment)비용, 유지(maintenance)비용, 운영(operation)비용 및 폐기(end of life)비용의 합으로 구성되어 있다. 도입 및 시설투자비용에는 차량구매, 각종 정비장비도입, 일정수준의 재고부품 확보율 유지, 기관사 및 철도요원의 교육비, 문서화 비용 등이 포함되며, 유지비용에는 예방정비(preventive maintenance) 및 고장정비(corrective maintenance) 비용 등이 포함된다. 한편 운영비용에는 철도수명주기 동안의 에너지 사용비용, 궤도사용비용, 운영요원 인건비 등이 포함되며 폐기비용에는 철도차량의 폐기에 소요되는 비용이 포함된다. 이와 같이 수명주기비용을 구성하는 비용요소는 모델별로 크게 다르지 않으며 다만 철도시스템의 운영전략에 따라 총 수명주기비용이 결정된다.

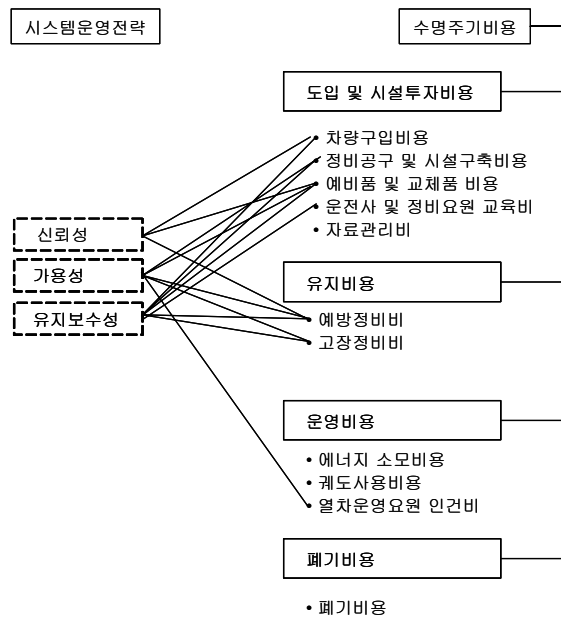


그림 4 수명주기비용 모델

3. 자기부상열차 수명주기비용 모델

3.1 제한

실제 현실에서 발생하는 모든 상황을 고려하여 도입 및 운영비용을 예측하는 것은 사실상 불가능하다. 수명주기비용 중 도입비용은 공급업체의 견적가 등을 토대로 상대적으로 정확하게 예측할 수 있으나 열차 총 운영기간중 발생하는 총소유비용은 정확하게 예측하는 것이 매우 어렵다. 이는 수명주기비용을 구성하는 각 비용요소들이 시스템 운영전략에 따라 독립적으로 변하는 것이 아니라 그림 4와 같이 상호

종속적으로 변하기 때문이다. 차량구입비용이 높아지면 신뢰성이 향상되고 이는 운영유지비에 영향을 미친다. 즉, 양질의 시스템을 도입하면 동일한 수준의 서비스를 제공하더라도 운영 및 유지비가 전체적으로 낮아진다. 따라서 실제 상황을 단순화하여 모델을 개발할 필요가 있으며 본 연구에서는 다음과 같은 가정 하에 모델을 단순화하고자 한다.

- 도입비 : 시스템 도입비중 시스템 구입비는 자기부상열차의 개발단계에서 어느 정도 정확히 예측되므로 제품비용구조(cost breakdown structure : CBS)를 기반으로 가능한 실제단가를 기준으로 계산하며, 예비품 및 교체품, 시설구축비, 교육비 및 자료관리비는 가용성 및 유지보수성을 만족시키는 범위에서 기존의 도시철도시스템 유지보수전략을 참고하여 각각 독립적으로 계산한다. 특히 예비품 및 교체품은 운영전략에 따라 변경될 수 있으므로 정확한 값을 도출하는 것은 한계가 있다.
- 유지비 : 유지비는 시스템을 이루는 구성품들의 CBS를 바탕으로 하여 예방정비 및 고장정비에 대해 각각 계산하며 이를 종합하여 시스템에 대한 유지비로 계산한다. CBS는 LRU¹⁾와 SRU²⁾를 참고하여 결정하며 고장 등의 상황이 각각 독립적으로 발생한다고 가정한다.
- 운영비 : 열차운영비는 에너지 소모비용 및 열차운영요원의 인건비를 위주로 계산하며 기타 열차운영 중 발생 가능한 비용에 대해서는 개개의 항목으로 계산하지 않고 형태로 계산한다.
- 폐기비 : 열차폐기비용은 환경문제 등 여러 가지 변수가 발생할 수 있으므로 쉽게 결정할 수 없다. 본 모델에서는 폐기비용이 타 비용에 영향을 끼치지 않는다는 가정 하에 기존 도시철도시스템을 참조하여 폐기비용을 계산하도록 한다.

한편, 열차운영 중 발생하는 장애 및 사고에 대한 간접비용, 예를 들면 운행지연에 따른 사회적 비용, 열차사고에 대한 시설복구비용, 승객 및 승무원에 대한 사상비용 등은 고려하지 않는다.

3.2 자기부상열차 수명주기비용 모델

본 연구에서 제안하는 자기부상열차의 수명주기비용 모델은 IEC 60300-3-3 기준을 바탕으로 하였으며 국내 자기부상열차의 운행환경을 가정하여 비용모델을 개선하였다. 자기부상열차의 수명주기비용 구성요소는 다음과 같다.

$$LCC = \frac{\text{도입비}}{C_{ic}} + \frac{\text{운영비}}{C_{in}} + \frac{\text{유지비}}{C_e} + \frac{\text{폐기비}}{C_o} + C_m + C_d \quad (3)$$

여기서,

- C_{ic} = 시스템 초기비용
- C_{in} = 시스템 장치비용
- C_e = 에너지 사용비용
- C_o = 시스템 운영비용
- C_m = 시스템 유지보수비용
- C_d = 폐기비용

① 시스템 초기비용(initial cost), C_{ic} : 초기비용은 시스템의 도입비용을 의미하며 자기부상열차의

1) LRU : Line Replaceable Unit-정비기지에서 교체될 수 있는 구성단위
 2) SRU : Shop Replaceable Unit-중정비기지에서만 교체될 수 있는 구성단위

PBS(product breakdown structure)를 기반으로 한 CBS를 이용하여 계산한다. 시스템 초기비용 C 는 각 제품도입비용, C_{pi} 을 모두 더한 값으로 계산하며, 만약 초기비용을 다년간 지급할 경우 연간지급비용, C_m 에 이자율, r 을 고려하여 계산한다.

$$C_i = \sum_{i=1}^n C_{pi} \quad (4)$$

$$C_{ic} = \begin{cases} C_i & \text{일시지급} \\ \sum_{i=0}^N \frac{C_{ni}}{(1+r)^i} & \text{다년간분할지급} \end{cases} \quad (5)$$

② 장치비용(installation cost), C_{in} : 장치비용은 운영요원의 교육비용, 장비설치비용 등을 의미하며 시스템 초기에만 발생한다. 이는 도시철도시스템의 유지보수에 필요한 장비리스트 가격 등을 활용하며 자기부상열차에 특화된 장비는 별도로 비용을 추가하여 계산한다.

적절한 예비품의 산정은 부품의 고장율 및 MTTR(mean time to repair) 시간과 밀접한 관계가 있다. 즉 고장율이 낮고 MTTR이 짧을수록 예비품 수량을 적게 확보하여도 무방하지만 반대의 경우에는 많은 예비품을 확보하여야 한다. Cheng⁽⁸⁾ 등은 고장율, λ , 예비품 수량, q , 고장횟수, x 에 대하여 어느 시점에서 예비품이 모자랄 확률, α 를 지수분포함수를 이용하여 다음과 같이 계산한 바 있다.

$$\alpha = \Pr\{x > q\} = 1 - \Pr\{x \leq q\} \quad (6)$$

$$= 1 - \sum_{j=0}^q \frac{e^{-\lambda MTTR} (\lambda MTTR)^j}{j!}$$

$\psi = \sum_{j=0}^q \frac{(\lambda MTTR)^j}{j!}$ 라고 놓으면, 예비품 확보를 위해 필요한 비용은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U(\alpha, C) = K_1 U(1 - e^{-\lambda MTTR \psi}) + K_2 U(q C_1) \quad (7)$$

여기서 K_1, K_2 는 예방정비와 고장정비 전략에 따른 가중치이며, C_1 은 단위부품비용이다.

③ 에너지비용(energy cost), C_e : 에너지 비용은 열차시스템 운영을 위한 에너지 사용비용으로 한정하며 기타 신호시스템, 역사운영 등에 필요한 에너지는 고려하지 않는다.

$$C_e = \sum_j E_j * EC_j \quad (8)$$

여기서 E_j 는 시스템에 따라 각각 소비된 에너지량이며 EC_j 는 단위에너지 값이다. 이때 에너지는 전기, 가스, 유류 등 다양하며 에너지 값에는 세금 등의 값이 포함된다.

④ 운영비용(operating cost), C_o : 운영비용은 에너지 비용을 제외한 비용으로 주로 운영을 위해 투입되는 사람의 비용을 의미한다.

$$C_o = \begin{cases} NP \times H_{py} \times C_h \\ NH_o \times C_h \end{cases} \quad (9)$$

여기서, NP 는 투입인원 수, H_{py} 는 연간 투입시간, C_h 는 시간당 비용 및 NH_o 는 실제투입시간에 대한 연간 투입시간을 의미한다. $NP \times H_{py}$ 와 NH_o 는 운영시간에 무관하게 일정하다고 가정하며, C_h 는 인플레이션에 따라 증가한다.

- ⑤ 유지보수비용(maintenance cost), C_m : 유지보수비용은 계획된 유지보수를 위한 시간당 인적자원 투입비용과 재고품유지비용을 의미한다.

$$C_m = NH_m \times C_h + C_{spare} \quad (10)$$

여기서 NH_m 는 운영기간에 대한 연간 투입시간이며 C_h 는 시간당 비용, C_{spare} 는 재고품 유지비용이다. NH_m 은 운영시간에 무관하게 일정하다고 가정하며 C_h 와 C_{spare} 는 인플레이션에 따라 증가한다고 가정한다. 유지보수비용은 예방정비를 위해 소요되는 비용, C_{PM} 과 고장정비를 위해 소요되는 비용, C_{CM} 으로 나눌 수 있으며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{PM} = \sum_j^n \text{부품수} \times \text{발생횟수} \{ \text{재료비} + (\text{인건비단가} \times \text{정비시간} \times \text{소요인원}) + (\text{재료가공비} \times \text{소요시간}) + (\text{레일점유비} \times \text{소요시간}) \} \quad (11)$$

$$C_{CM} = \sum_j^n \text{부품수} \times \text{고장율} \times \text{사용시간} \times \text{연간레일운용시간} \{ \text{재료비} + (\text{인건비} \times \text{정비시간} \times \text{소요인원}) + (\text{가공비} \times \text{소요시간}) + (\text{레일점유비} \times \text{소요시간}) \}$$

- ⑥ 폐기비용(decommissioning cost), C_d : 폐기비용은 수명을 다한 시스템의 폐기비용을 의미한다.

$$C_d = \frac{C_d^*}{(1+r)^N} \quad (12)$$

4. 토의 및 향후연구계획

지금까지에서 보는 바와 같이 수명주기동안 실제 투입비용을 정확히 예측하는 것은 사실상 불가능하다. 그러나 보다 유사한 예측결과를 얻기 위해서는 시스템의 신뢰성(고장주기, 발생률 등)이 정확히 평가되고 운영 및 유지보수전략이 실제 운행상황에 가깝게 모델링 된 다음 단계별 행동(action)에 대한 비용모델링이 이루어져야 한다. 이는 단번에 이루어질 수 있는 것이 아니라 기본비용모델을 만들고 이를 실제 현실에서 발생하는 비용요소와 비교하면서 지속적으로 개선하는 작업이 필요하다. 비록 본 연구에서 자기부상시스템의 수명주기비용을 예측하기 위한 기본적인 모델을 제안하였으나 실제 비용을 계산하기 위해서는 여러 단계에 걸친 모델 세분화가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 논문에서는 자기부상열차의 수명주기비용모델 개발에 관한 연구에 대해 소개하였다. 한국형 자기부상열차에 적절한 수명주기비용모델의 개발을 위하여 관련된 해외사양 및 규격을 분석하였으며 국외에서 수행된 유사 수명주기비용 모델도 분석하였다. 이를 통하여 현재 개발 중인 자기부상열차의 수명주기비용모델 개발을 위한 전략을 제시하였다. 향후에는 자기부상열차의 PBS를 바탕으로 CBS를 구축하며 각 비용요소들을 정량화함으로써 정량적인 LCC 계산이 가능한 모델을 개발할 계획이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] J. Stern, 1994, "Life cycle cost : A method for reducing costs and improving railway vehicles", Proceedings of World Congress Railroad Research, pp.661-666.
- [2] U. Kjellsson, 1999, "From X2000 to crusaris regina : Development of LCC technology", Proceedings of World Congress Railroad Research, pp.1-7.
- [3] G. Holden, 2003, "Life cycle cost issues in rolling stock assessment", Lloyds list DCN Rail Maintenance and Asset Management Conference, pp.1-9.
- [4] IEC 60300-3-3, 2004, "Application guide - Life cycle costing", IEC International Standards.
- [5] UNIFE LCC group, 1997, "Guidelines for Life Cycle Cost Volume I~IV", <http://www.unife.org>
- [6] 박종목, 김필환, 이종권, 2002, "전동차 수명주기비용에 대한 고찰", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.396-407.
- [7] 정종덕, 배대성, 2005, "입환기관차의 LCC 평가분석", 한국철도학회논문집 제 8권 제 3호, pp.260-266.
- [8] Y.H. Cheng, A.S. Yang and H.L. Tsao, 2006, "Study on rolling stock maintenance strategy and spares parts management", Proceedings of World Congress Railroad Research.