한국철도학회논문집
제12권 제6호 2009년 ▌pp. 1076-1080

자기부상열차 시스템의 수명주기비용 모델링에 관한 연구

A Study on Modeling of Life Cycle Cost for Magnetic Levitation Train

이윤성* · 김진오† · 김형철** · 장동욱**
Yun-Seong Lee · Jin-O Kim · Hyung-Chul Kim · Dong-Uk Jang

Abstract An analysis of Life Cycle Cost (LCC) is to evaluate the system through the total cost accounting during the total life cycle. Railway system has problem that abundant capital has to be utilized efficiently because railway system is a combined system such as power supply, machines, electric signals. Especially, Magnetic Levitation Train needs high technique and more study about the Life Cycle cost by using the system being developed currently in Korea. Therefore, the Modeling of Life Cycle Cost for Magnetic Levitation Train is proposed considering the tendency of the studies in other countries.

Keywords : Life Cycle Cost, Maglev Train

요 지 수명주기비용(Life Cycle Cost, LCC) 분석이란 분석 대상의 수명주기 전 기간에 걸친 총 원가산정을 통하여 해당 시스템을 평가하는 것이다. 철도시스템은 급전, 기계, 전기신호 등의 분야가 결합된 시스템으로 대규모 자본을 효율적으로 이용해야만 하는 문제를 안고 있다. 특히, 자기부상열차 시스템은 고도의 기술력이 필요하며 현재 국내에서 개발 단계에 있는 시스템으로, 비용 관련 연구가 더욱 필요한 실정이다. 따라서 국외의 철도시스템 및 자기부상열차 시스템에 대한 수명주기비용 연구 동향을 바탕으로 하여 국내의 자기부상열차 시스템에 적용할 수 있는 수명주기비용에 관한 모델을 제안하고자 한다.

주 요 어 : 수명주기비용, 자기부상열차, Life Cycle Cost

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

수명주기비용이란 분석 대상의 수명주기 전 기간에 걸친 총 원가산정을 통하여 기업의 수익과 원가의 대응 및 원가 전략을 개선하는 개념이다[1]. 철도시스템은 급전, 기계, 전기신호 등의 분야가 결합된 시스템으로 대규모 자본을 효율적으로 이용해야만 하는 문제가 있다. 특히, 자기부상열차 시스템은 초고속 달성을 위한 투자비용과 효율적인 시스템 구축이 중요한 실정이다. 철도시스템분야의 수명주기비용에 관한 연구동향으로는 철도시스템의 안정적인 운영과 경제성있는 유지보수를 위해 정확한 수명주기비용을 예측하기 위한 'IEC60300-3-3' 규격을 유럽에서 제정하였고, 그 외 세계적으로 'ISO', 'NORSOK', 'REMAIN', 'UNIFE', 'PROMAIN' 등 다양한 연구 활동이 수행되고 있다. 수명주기비용 산정의 근본 목적은 어떤 설비를 개발하고 기술과 개념의 형성 단계에서부터 시스템의 구성방법 결정, 설계대안의 결정 등 전반적인 시스템 구성과 관련된 의사결정 시 효과적인 정보를 제공함에 있다. 또한 수명주기에 따른 비용자료를 체계적으로 관리함으로써 설비운영과 관련된 각종 비용추정 및 유사 동종 설비의 수명주기비용 산출을 가능하게 한다.

수명주기비용은 설비 체계의 수명주기 동안 발생하는 총 비용을 추정, 평가하는 방법론이며, 총 비용은 연구개발비, 투자비, 운영유지비 및 폐기비로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 'IEC 60300-3-3' 규격을 바탕으로 하여 현재 국내 개발단계에 있는 자기부상열차 시스템의 경제성 분석에 적용할 수 있는 수명주기비용 모델을 제안한다. 또한 수명주기비용의 투자비 규모를 좌우할 가장 큰 요소인 설

† 책임저자 : 정회원, 한양대학교, 전기제어생체공학부, 교수
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0347 FAX : (02)2220-1856
* 정회원, 한양대학교 대학원, 전기공학과
** 정회원, 철도기술연구원

비의 유지보수를 고려하여 새로운 가용률 산정 방법을 기술하였다.

2. 수명주기비용

2.1 수명주기비용 분석의 절차

수명주기비용은 설비 체계의 수명주기 동안 발생하는 총 비용을 추정, 평가하는 방법론이며, 총 비용은 연구개발비, 투자비, 운영유지비 및 폐기비로 구분할 수 있다. 수명주기비용 분석은 여러 분야에서 각 분야의 특성에 맞게 수행되고 있지만 기본적인 절차는 Fig. 1과 같다[2].

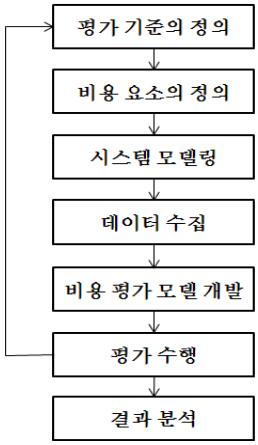

Fig. 1. Procedure for LCC

평가 기준의 정의는 비용 요소와 시스템의 효율 요소를 구분하여 각 요소별로 정의하는 것이다. 시스템 설계와 운영에 필요한 의사결정을 하는 데 있어서는 비용적인 측면과 성능적인 측면이 동시에 고려되어야 한다. 따라서 시스템 특성이나 생산 용량, 품질, 성능 특성 등과 같은 시스템 효율 요소를 정의하고 시스템을 평가할 기준을 세워야 한다.

비용 요소의 정의는 시스템을 설계하고 운영하는 데 필요한 모든 종류의 비용을 정의하는 것이다. 수명주기비용의 국제 규격서인 IEC 60300-3-3에서는 Fig. 2와 같은 구조를 제시하고 있다.

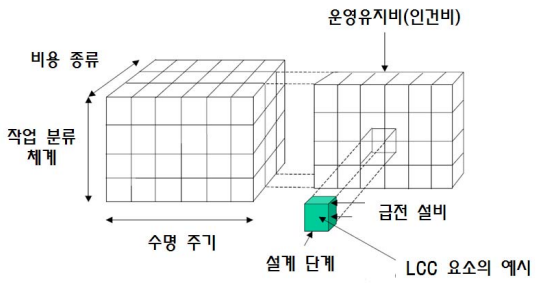

Fig. 2. Definition of cost elements

Fig. 2를 보면, 해당 비용 요소의 비용 종류와 작업 분류, 수명 주기에 따라서 수~수십개의 블럭으로 나누어져 있고, 모든 블럭이 합해졌을 때 전체의 비용이 나온다는 것을 나타내고 있다. 그 중 하나의 블럭을 살펴볼 때, 이것은 비용 종류로써는 인건비(운영유지비)에 속하고, 작업 분류에서는 급전 설비에 해당하며, 시스템의 수명주기 측면에서 보았을 때는 설계 단계에 해당하는 것이다. 비용 요소의 정의 단계에서는 Fig. 2에서 보듯이 시스템에서 사용되는 수명주기에 따른 비용의 종류를 분류하고 작업의 구분에 따라 체계를 나누는 작업을 수행한다.

시스템 모델링 단계는 시스템의 입력과 출력, 그리고 비용간의 적절한 관계를 찾는 과정이다. 시스템의 가용률을 계산하거나 유지보수, 운영방식 등에 대한 모델링이 이루어진다. 시스템 모델링을 어떻게 하는가에 따라 차후에 수행될 비용 평가 모델의 개발 단계에서의 결과가 달라질 수 있으므로 중요한 단계라고 할 수 있다. 데이터 수집에서는 시스템을 운영하면서 발생되는 데이터를 취득하고 누적하는 단계이다.

비용 평가 모델의 개발에서는 실질적으로 시스템을 설계하고 개발하며, 운영하는 데 필요한 모든 비용 체계를 구성하고, 앞서 취득한 데이터를 바탕으로 하여 계산될 수명 비용 평가 모델을 구축하는 단계이다. 수명주기비용 평가의 주목적은 장기간의 재정 계획 수립에 있다. Fig. 3에서 보듯이 수명주기비용 평가를 하지 않았을 때의 수명 주기에 따른 기본 비용 곡선이 있다면, 수명주기비용 평가를 통해 대안적인 비용 곡선을 따르게 할 수 있다는 것이다[2].

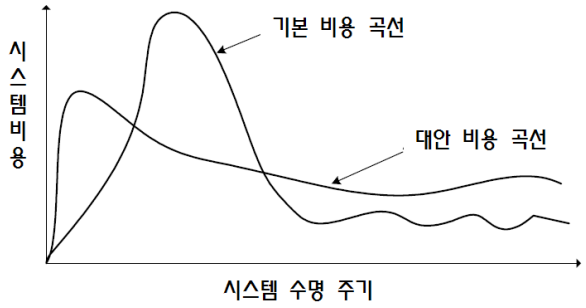

Fig. 3. Cost curve for life cycle of the system

비용 평가 모델이 개발되었다면, 평가 수행 단계에서 누적된 운영 데이터 및 비용 내역을 이용하여 수명 주기 동안의 총 비용 평가가 이루어지고, 마지막으로 수명주기비용 평가의 결과를 분석함으로써 수명주기비용 평가의 모든 단계가 마무리된다.

2.2 IEC 60300 LCC 모델

IEC에서는 수명주기비용 평가 모델을 시스템비용구조, 가변비용요소, 수명주기단계로 크게 3개의 요소로 구분하고 있다[3]. 시스템비용구조는 시스템 모델링 단계에서 파악할 수 있는 시스템의 총 재료비를 나타내고, 가변비용요소는 운영적 측면에서 재료비, 운영비, 유지보수비, 폐기비 등을 포함하는 요소이며, 수명주기단계는 기준정의, 설계, 제조, 설치, 운영, 폐기 등에 따른 시간단계를 나타낸다. IEC에서는 3개의 비용요소를 모두 합함으로써 전체 수명주기비용을 계산하고 있다.

$$LCC = C_{acquistion} + C_{ownership} + C_{disposal} \tag{1}$$

여기서 $C_{acquistion}$은 도입비, $C_{ownership}$은 소유비, $C_{disposal}$은 폐기비를 나타낸다.

2.3 자기부상열차 수명주기비용 모델

자기부상열차 시스템의 수명주기비용 모델을 수립하는데 있어서는 연구개발비, 투자비, 운영유지비, 폐기비의 추정방법에 대한 고려가 필요하다. 연구개발비는 공학설계, 분석, 개발, 시험, 평가와 관련된 모든 비용을 종합한 것으로 연구인건비, 시제비, 시험평가비, 교육훈련비와 같은 비용요소를 포함하여 산출한다.

$$C_{RD} = \sum_{i=1}^{N} C_i \tag{2}$$

여기서 C_{RD}는 자기부상열차 시스템의 총 연구개발비, C_i는 연구개발비에 포함되는 비용요소, N은 연구개발비에 포함되는 비용요소의 총 수를 나타낸다.

투자비는 자기부상열차 차량 구입비, 노반 시설비, 변전시스템 시설비, 스위칭시스템 시설비, 컨버팅 시스템 시설비, 차량기지 시설비, 설비 고장 시 예비품 구입비 등을 포함한다.

$$C_{IN} = \sum_{j=1}^{M} C_j \tag{3}$$

여기서 C_{IN}는 자기부상열차 시스템의 투자비, C_j는 투자비에 포함되는 비용 요소, M은 투자비에 포함되는 비용 요소의 총 수를 나타낸다.

이 때 예비품 구입비는 차량의 운영 조건 및 설비의 유지보수 전략에 따라 크게 차이가 날 수 있다. 예비품의 산정은 설비의 고장률과 MTTR(Mean Time to Repair)과 밀접한 관계가 있다[4]. 상대적으로 낮은 고장률을 가질수록, 또는 MTTR이 짧은수록 예비품의 수량을 적게 확보하여도 되기 때문에 설비의 가용률이 투자비 산정에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 시스템 운영자는 설비의 가용률을 예측하여야하고, 투자비의 산출에 예측된 가용률을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 투자비 산출을 위하여 자기부상열차 시스템의 가용률을 결정하는 방법을 제안한다. 설비의 가용률을 결정하는 일반적인 방법은 식 (4)와 Fig. 4에 나타나 있다.

$$Availability = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{MTTF}{MTBF} \tag{4}$$

여기서 $MTTF$(Mean Time to Failure)는 설비가 작동하면서 고장이 발생하기까지의 평균 시간을 나타내고, $MTTR$(Mean Time to Repair)는 고장이 발생하고 정상 동작을 위한 수리 작업이 완료되기까지의 평균 시간을 의미한다. $MTBF$(Mean Time between Failures)는 고장과 고장사이의 평균 시간을 나타낸다.

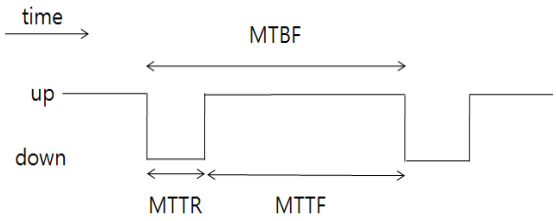

Fig. 4. MTBF, MTTF and MTTR

Fig. 4와 식 (4)에서 같이 일반적인 설비의 가용률은 설비의 동작시간에 설비의 고장시간과 동작시간을 합한 한 주기를 나눔으로써 구할 수 있다. 하지만 식 (4)는 고장시간과 동작시간만을 고려하여 자기부상열차 시스템의 실제적인 운영 환경을 반영하지 못 한다는 단점이 있다. 자기부상열차 시스템에서의 사고는 인명피해를 동반하는 대형사고의 위험이 있기 때문에 항상 예방정비(Preventive Maintenance)를 해야 하며 따라서 예방정비적 요소를 고려하는 가용률을 적용해야 한다. 식 (5)는 고장정비(Corrective Maintenance)을 고려하여 자기부상열차 설비의 가용률을 산정하는 식이다.

$$A_c = \frac{MTBF}{MTBF + MCMT} \tag{5}$$

여기서 A_c는 고장정비(CM)를 고려한 가용률, $MCMT$(Mean Corrective Maintenance Time)은 평균 고장정비 시간을 나타낸다. 설비의 고장시간과 동작시간을 합한 한 주

기에서 고장정비 시간을 고려함으로써 이상적인 정비 환경에서의 특성 가용률을 의미한다[5].

식 (5)에 예방정비(PM)시간과 그에 따르른 업무 계획의 변경, 운영 지연 시간 등을 고려해야 실제적인 자기부상열차 설비의 가용률을 설정할 수가 있고, 이를 Fig. 5에 나타내었다.

$$A_{new} = \frac{MTBM}{MTBM + MCMT + MPMT + MDT} \tag{6}$$

여기서 A_{new}는 새로운 자기부상열차 설비의 산정 가용률, $MTBM$(Mean Time Between Maintenances)는 총 유지보수 시간과 동작시간의 합, $MPMT$(Mean Preventive Maintenance Time)는 평균 예방정비 시간, MDT(Mean Delay Time)는 평균 지연 시간으로 고장정비 및 예방정비로 인한 운영 계획 지장 및 지연 시간을 의미한다. A_{new}는 투자비의 큰 변동요인 중 하나인 유지보수 운영방식과 예비품 보유량 등을 현실성 있게 반영하기 위해 적용할 수 있는 가용률이다.

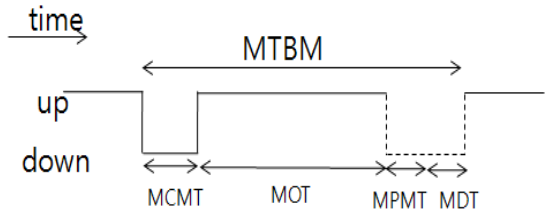

Fig. 5. Availability for operating characteristic of the system

Fig. 5에서 MOT(Mean Operation Time)은 평균 운행 시간을 의미한다.

자기부상열차 설비의 고장으로 인한 고장정비 시간뿐만 아니라 예방정비 시간, 유지보수로 인한 운행 지연 시간을 고려하여 예비품의 적정 수량을 결정함으로써 투자비의 보다 정확한 산정을 기대할 수 있다.

운영유지비는 수명주기 동안 시스템을 운영, 유지하기 위한 반복성 비용으로써, 에너지 비용과 운행비용, 유지보수비용으로 생각할 수 있다. 자기부상열차에 사용되는 에너지는 추진전력, 부상전력, 역사운영전력, 전기신호제어전력 등이 있고, 운행비용은 에너지 비용과 유지보수비용을 제외한 차량 운행을 위한 인력 투입에 대한 비용을 의미한다[7].

$$C_{OP} = P \times T \times C_P + \sum_{k=1}^{O}(E_k) + C_{CM}T_{CM} + C_{PM}T_{PM} + C_{redundancy} \tag{7}$$

여기서 C_{OP}는 자기부상열차 시스템의 운영유지비, P은 운행에 투입되는 인원수, T는 연간 투입시간, C_P는 시간 당 비용을 나타내고, E_k는 에너지 비용 요소, O는 에너지 비용 요소의 총 수를 나타내며, C_{CM}과 C_{PM}은 각각 고장정비와 예방정비의 시간당 유지보수 비용, T_{CM}과 T_{PM}은 각각 고장정비와 예방정비 시간, $C_{redundancy}$는 예비품 유지비용을 의미한다.

폐기비(C_{DE})는 수명주기를 다한 설비의 폐기비용을 의미하는 데, 반대로 잔여가치 또는 교환가치로 생각할 수도 있다. 설비의 교체가 이루어 질 때 그 시점에서의 교환가치를 고려하여 교체시기를 결정하는 경우도 있기 때문에 설비의 잔여가치와 유효수명은 상호 연관성이 있다고 볼 수 있다. 따라서 수명주기비용의 정확한 산정을 위해서는 설비의 경제적 수명주기에 대한 추정이나 잔여가치에 대한 분석이 뒷받침되어야 한다.

자기부상열차 시스템의 총 수명주기비용은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$LCC = C_{RD} + C_{IN} + C_{OP} + C_{DE} \tag{8}$$

시스템을 구성하는 설비가 여러 해에 걸쳐 도입되고 운영될 경우 수명주기 동안의 발생비용을 현재 가치로 환산할 필요가 있다. 비용 요소 중 현재 기준 i년도 후의 비용이 P_i인 수명주기비용의 현가 P는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \sum_{i=0}^{n} \frac{P_i}{(1+d)^i} \tag{9}$$

여기서 d는 할인율(이자율), n은 수명주기 년도를 의미한다.

3. 사례연구

본 논문에서 제안한 자기부상열차 시스템의 수명주기비용 산정 방법을 실제 적용시켜 보았다. 적용 대상 자기부상열차 시스템의 모의 사양은 미국의 도시간 자기부상열차 시스템 운영 데이터를 참고하였다[6]. 시스템 데이터와 수명주기비용 평가 결과를 Table 1에 나타내었다.

연구개발비에는 시스템 설계비, 개발비, 시험평가비, 교육훈련비 등이 포함되고, 투자비에는 차량구입비, 노반 시설비, 선형 동기전동기 고정자 비용, 변전소 시설 비용, 예비품 구입비 등이 포함된다. 운영유지비에는 운행인력비, 전력 사용 비용, 유지보수비 등이 포함된다. 이상의 비용과

할인율을 고려하여 수명주기비용을 산정하여 보았다.

Table 1. Maglev system data and Result for analysis of LCC

연구개발비	설계비	$300,000	운영유지비	주행거리	100,000 km/y
	개발비	$500,000		수명주기	30 years
	시험평가비	$300,000		운행인력비	$10/hour
	교육훈련비	$100,000		운행인원수	50 manh/day
투자비	차량구입비	$1,322,000		수용능력	500 seats
	노반 시설비	$6,376,000		전력소비	34 Wh/seat·km
	LSM Stator	$4,054,000		유지보수비(차량)	$0.19/km
	변전 시설비	$9,589,000		유지보수비(노반)	$0.37/km
	예비품 구입비	$150,000/y	할인율	4%	
			LCC	$44,813,831 over 30 years	

4. 결 론

지금까지 언급한 내용과 같이 시스템의 수명주기 동안에 투입되고 사용되는 연구개발비, 투자비, 운영유지비, 폐기비 등을 산출하고 정확히 예상하는 것은 많은 오차를 수반하게 된다. 본 논문에서는 자기부상열차 시스템의 수명주기비용을 산정하기 위한 방법을 제시하였으며, 보다 정확한 예측결과를 얻기 위한 자기부상열차 설비의 가용률 결정을 위한 방법론을 제시하였다. 본 연구에서는 IEC 60300-3-3을 바탕으로 하여 자기부상열차의 수명주기비용 산정을 위한 연구개발비, 투자비, 운영유지비, 폐기비를 산출하는 기본적인 모델을 소개하였으나, 보다 실제적이고 구체적인 결과를 얻기 위해서는 자기부상열차 시스템의 구성에 대한 세분화된 분석이 필요할 것이다. 차후 연구로써 본 논문에서 소개한 수명주기비용 산출 방법을 바탕으로 하여 보다 정확한 결과를 얻기 위해, 설비의 신뢰성에 관한 연구를 수행하고 신뢰도 기반 유지보수(Reliability Centered Maintenance)를 도입한 자기부상열차 시스템의 모델링에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 황용호, 김종태(1995), “수명주기비용 산정모델에 관한 연구”, 회계학논총, 제 4호, pp.23-24.
2. Yoshio Kawauchi, Marvin Rausand(1999), “Life Cycle Cost analysis in oil and chemecal process industries.”
3. IEC 60300-3-3(2004), “Application guide - Life Cycle Costing,” IEC International Standards.
4. 전현규, 김재훈, 김종운, 박준서(2007), “자기부상열차 수명주기 비용모델 개발을 위한 기초연구”, 한국철도학회 논문집, pp.76-83.
5. B. S. Blanchard and W. J. Fabrycky(1998), “Systems engineering and analysis 3rd edition,” Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering.
6. Federal Transit Administration(2003), “The M3 urban transportation system,” MagneMotion Document UM-1, Version 1.
7. H. K. Jun and J. H. Kim(2007), “Life cycle cost modeling for railway vehicle,” Proceeding of International Conference on Electrical Machines and System.

접수일(2009년 10월 30일), 수정일(2009년 11월 18일),
게재확정일(2009년 12월 18일)