

신규차량 도입시기 의사결정을 위한 인버터제어 전동차의 잔여수명에 따른 비용분석

Cost Analysis of VVVF Inverter Train Based on Life-cycle to Determine the Introduction Timing of New Trains

이광섭* · 이찬우 · 양근율 · 민재홍 · 신종진

Kwang-Sub Lee · Chan Woo Lee · Keun-Yul Yang · Jae Hong Min · Jong Jin Shin

Abstract Before urban railway vehicles reach their design life-span, operating agencies should determine when to buy new vehicles. Previous LCC (Life Cycle Cost) studies were limited because they independently focused on existing vehicles based on costs that directly impacted only the operating agency without considering effects such as social costs and the reduction of maintenance costs. Thus, it is difficult to systematically determine when to buy new vehicles. This study investigated the operating and maintenance related costs, especially from additional expenses and social costs due to unexpected vehicle failures and safety accidents, and did an economic analysis of scenarios with different discount rates. Considering that the public is very concerned about safety after the Sewol ferry accident, additional costs, which include social costs, should be included in the analysis. This study shows that the economic priority of scenarios may change depending on whether those costs are included and on the discount rate. The results of this study can help in the decision-making process for the planning and buying of new trains.

Keywords : VVVF Inverter train, Life-cycle, Social costs, Cost analysis

초 록 도시철도 운영기관은 전동차의 설계수명이 도래하기 전에 신규차량 도입 시기를 결정해야 한다. 최근 널리 활용되고 있는 생애주기비용(LCC; Life Cycle Cost) 연구는 현재 운행 중인 분석대상 전동차에 직접적으로 소요되는 비용만을 고려하며 신규차량 도입으로 인한 유지보수비용의 절감효과, 사회적비용 등을 고려하지 않아 신규차량 구매 시기에 따른 비용을 종합적으로 판단하기 어렵다. 본 연구에서는 LCC에서 활용되는 비용과 노후화에 따른 고장 및 안전사고로 인한 운영기관의 부대비용, 피해승객의 사회적 비용을 포함하고, 신규차량의 구매 시기에 따른 대안별 비용분석, 할인율 변화에 따른 민감도를 분석하였다. 세월호 사고 이후 안전사고에 대한 국민적 경각심이 높은 점을 감안할 때 차량 도입 시기에 대한 의사결정 과정에서 부대비용과 사회적비용을 함께 고려할 필요가 있으며, 본 연구결과 이러한 비용의 포함여부 및 할인율에 따라 대안의 경제적 우선순위가 변동될 수 있음을 보여주었다. 이는 향후 차량수급 중장기 경영계획 수립을 위한 의사결정에 큰 시사점을 줄 것으로 판단된다.

주요어 : 인버터제어 전동차, 생애주기, 사회적비용, 비용분석

1. 서 론

1.1 연구의 배경

도시철도 운영기관은 차량의 운영 및 유지보수 계획뿐만 아니라 전동차의 설계수명이 도래하기 전에 기존 전동차의 수명을 연장할 것인지 또는 신규차량을 언제 구매할 것인지 여부를 결정해야 한다. 즉, 기존 차량의 잔여수명을 합리적으로 산정하고, 연장사용에 따른 기존 차량의 건전성과 안전성을 보장하기 위해 추가적으로 투입해야 할 개조비용과 신규 차량 도입 시 절감할 수 있는 운영 및 유지보수 비용 등을 포함한 비용을 분석하여 중장기 경영계획을 수립할 필요가 있다.

그 동안의 철도차량 수명연장에 대한 생애주기비용(LCC; Life Cycle Cost) 분석연구는 차량 운영자 또는 제작자 입장에서 직접적으로 소요되는 비용만을 고려하였거나, 분석 대상 차량을 현재 운행중인 차량으로 제한하여 신규차량 도입시기 및 이에 따

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5686, E-mail: leeks33@krii.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.1.77>

른 유지보수비용의 변화(절감효과) 등을 고려하지 못해 신규차량 구매 시기에 따른 비용을 종합적으로 판단하기 어려웠다. 특히, 2014년 4월 세월호 사고 이후 안전사고에 대한 국민적 인식이 상당히 높아져 있는 반면, 기존 연구에서는 고장(운행장애) 및 안전사고 등으로 인해 운영기관이 추가적으로 부담해야 하는 부대비용과 피해 승객에게 미치는 사회적 비용을 고려하지 못한 한계가 있다.

1.2 연구의 목적 및 방법론

본 연구에서는 LCC 기법에서 활용되는 유지보수 관련 비용을 분석하고 신규차량의 구매 시기에 따른 시나리오별 비용분석, 경제적 할인율의 변화에 따른 민감도분석 뿐만 아니라 고장 및 안전사고에 따른 운영기관의 부대비용과 사회적비용을 포함하여 비용을 분석하고자 한다. 분석을 위해 인버터제어 전동차 표본조사 사례분석을 통해 수명 주기비용을 고려한 예방 및 보수 정비 비용 등을 산정하고, 차량의 안전성 및 건전성을 유지하고 노후화된 주요장치를 개선하기 위한 비용, 고장 및 사고로 인한 부대비용(정기적으로 소요되는 예방정비비용을 제외한 고장으로 인한 정비비용, 고장수리로 인한 운행손실)과 사회적비용(고장, 사고 및 지연으로 인한 승객의 손실, 인적 및 물적 피해비용) 등을 포함하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 도시철도 차량 수명주기 분석 관련 기존 연구와 국내외 철도차량의 사용내구연한 및 운용현황을 검토하고 3장에서 인버터제어 전동차의 비용을 분석한다. 오이도~당고개 구간에서 운행 중인 인버터제어 전동차 표본 5량을 조사하여 외관검사, 주행장치 결합검사, 고장 및 유지보수 현황을 조사 분석하였으며, 최근 3년간 비용관련 데이터를 수집하여 평균 유지보수 비용을 분석하였다. 또한 차량이 노후화 될수록 고장(장애) 및 안전사고의 발생 가능성이 커지므로 이에 대한 정비비용, 운영기관의 운행(영업)손실, 인적 및 물적 피해비용, 사회적 비용 등을 분석하였다. 이를 바탕으로 신규차량 도입시기별 비용분석을 수행하고 할인율 변화에 따른 민감도분석 결과를 검토한다. 마지막 장에서 정책적 시사점과 연구의 한계에 대해 논의한다.

2. 기존 연구 고찰 및 도시철도차량 운용 현황

2.1 기존 연구 고찰

LCC는 도시철도 차량의 사용내구연한 또는 수명주기 분석, 경제성 분석을 위해 최근 많이 활용되고 있는 기법이다[1-6]. LCC는 전동차 구매에서부터 폐차까지 이르는 차량의 총 생애주기에서 소요되는 비용의 총합을 말하며, 초기 투자비용(전동차 구입가격 및 감가상각비 등), 유지보수비용(예방 및 보수정비 비용 등) 및 운영비용(에너지소비, 선로사용 비용 등)을 포함한다.

Chung과 Lee [1]는 서울메트로 인버터제어 전동차의 LCC를 분석하여 전동차의 경제적 내구연한을 추정하였으며 평균 총비용 측면에서 경제적 사용내구연한은 46년, 유지보수비용 가중치 10%를 고려할 경우에는 41년으로 산출하였다. 하지만, 연구대상 전동차의 최대 사용가능 기간을 도입부터 50년으로 가정하여, 철도안전법에서 규정하고 있는 최대 40년을 초과하여 분석하였다. Park과 Kim [2]은 1993년에 도입된 인버터제어 전동차를 대상으로 샘플링을 통한 표준화를 통해 LCC 비용을 산정하고 경제적 내구연한을 도출하였다. 신규차량의 교체시점은 분석대상 차량의 비용만을 고려하였으며 주기적으로 발생하는 총비용의 변곡점 중 비용이 가장 많이 투입되는 시점을 교체시점으로 판단하였다. Park [3]은 코레일 인버터제어 전동차의 LCC를 분석하였으며, Kim 등 [4]은 LCC 비용 계산에 필요한 철도차량의 규격과 가이드 등 관련된 자료를 조사 및 분석하고 유지보수정보 DB 템플릿을 제안했으며 철도차량 부품에 대한 LCC를 산정하였다. Lee 등 [5]은 자기부상열차 시스템의 수명주기비용 산정 방법을 제시하고 미국의 도시 간 자기부상열차 데이터를 기반으로 수명주기비용을 평가하였다.

앞에서 검토한 기존 연구들은 신규차량의 도입 및 그로 인한 유지보수비용 절감을 고려하지 않고 현재 운행중인 차량의 LCC 만 고려했다. 이에 반해 Han 등 [6]은 도시철도 차량 시스템의 LCC분석을 위해 RAM(Reliability, Availability and Maintainability; 신뢰성, 가용성, 유지보수)을 고려하고 차량은 일반차량(표준전동차)과 신뢰성을 향상시킨 차량을 함께 고려하여 분석하였다.

한편, 생애주기비용 산정 또는 사용내구연한 분석과는 달리 LCC의 적용절차에 관한 연구도 수행되었다. Chung 등 [7]은 도시철도차량의 조달과정에서 내에서 LCC의 분석절차를 설명하고, LCC 사전분석 단계부터 검증 및 보증단계에 이르는 절차에 대해 연구하였다. Kim 등 [8]은 운영기관 입장에서 철도차량을 획득하는 과정에서 LCC를 도입하기 위한 LCC의 적용 절차 및 모형을 제시하였다.

2.2 철도차량 사용내구연한 및 운용 현황

국내 도시철도 운영기관 중 차량이 20년 이상 된 도시철도 차량을 운영하고 있는 기관은 한국철도공사, 서울메트로, 서울도

Table 1. Number of cars over 20 years old operated by urban railway operating agencies.

Starting year	KORAIL		Seoul metro			SMRT	Busan transportation corporation	Age of cars as of 2014
	Resistor	Inverter	Resistor	Chopper	Inverter	Inverter	Chopper	
1985	18						84	30 years
1986	8						48	29 years
1987	21							28 years
1988	45						54	27 years
1989	27	5	64	78				26 years
1990	2			67				25 years
1991	66			175			30	24 years
1992	42			80				23 years
1993	0	117		60	128			22 years
1994	51	92		20	290	16	84	21 years
1995	15	193		20	52	366		20 years
1996	54	144				452		19 years
Sum	349	551	64	500	470	834	300	-
Design life-span	25 years	25 years	25 years	25 years	25 years	25 years	25 years	-

시철도공사 및 부산교통공사 등 총 4개 기관이다(Table 1). 전동차는 초기에 저항제어 차량이 도입되었으나 현재는 폐차 또는 인버터제어 차량으로 교체되고 있다. 국내 도시철도차량의 사용 내구 연한 관련 기준 및 법규는 도시철도법과 철도안전법에서 규정하고 있다. 철도안전법이 처음으로 시행된 것은 2005년이었으며, 설계수명이 도래된 차량에 대하여 최대 사용 내구 연한이 25년으로 제한되었다. 다만, 25년 이상 연장 사용을 위해서는 정밀안전진단(상태평가, 안전성평가, 잔존수명평가)를 통해 최대 40년까지 사용할 수 있도록 규정하였다. 2009년에 개정된 철도안전법에서는 철도차량의 사용내구연한을 명시하여, 이 연한을 초과한 철도 차량을 운행할 수 없도록 규정하였다. 철도차량 종류별 사용내구연한을 살펴보면 1991년 이후에 제작된 전기기관차의 경우 내구 연한이 고속철도차량은 30년, 일반철도차량은 20~30년(디젤기관차 25년, 전기기관차 30년, 디젤동차 20년, 전동차 25년, 객차 25년, 화차 30년)으로 규정하고 있다. 다만, 차량 사용연한에 도달한 차량에 대해 국토교통부장관이 실시하는 정밀진단을 받아 안전운행에 적합하다고 인정되는 경우에 한해 그 사용내구연한을 연장할 수 있다. 예를 들어 전동차의 경우 내구 연한이 25년으로 제한되어 있으나 정밀진단을 통해 최대 40년까지 사용할 수 있도록 되었다. 2012년에 개정된 철도안전법에서는 사용내구연한 관련 사항이 삭제되고 내구 연한 관리는 국가기관에서 운영기관으로 자율적으로 넘어가는 형태가 되었으나 내용적으로는 2009년 시행된 철도안전법의 법규를 준수해야 하는 형태이다. 하지만, 세월호 사고 이후 안전사고에 대한 관심이 증가하면서 2014년 5월 개정 시에는 차량 내구 연한 관리를 2009년 규정 수준으로 되돌리면서 안전을 다시 강화하였다.

외국의 도시철도차량 사용내구연한을 살펴보면, 국내 철도차량과 유사한 일본의 경우, 과거 철도차량 폐차기준을 운영한 사례가 있지만 현재는 폐지되어 법적인 사용내구연한에 대한 제한이 없다. 영국과 미국에서도 철도차량의 사용내구연한/폐차기준 및 정밀진단에 대해 국가적으로 법규를 만들어 규제하고 있지 않고 각 운영기관마다 철도차량 도입 시 정기검수 및 전반검수 계획을 수립하여 차량을 관리하고 있다[9].

3. 인버터제어 전동차 비용 분석

3.1 유지보수 관련 비용 분석

전동차의 유지 및 관리를 위해 소요되는 비용에는 정기적으로 수행되는 유지보수비(기본검수(ES), 경정비(LI-3,4), 중정비(GI-3,4 및 GI-6,7))와 비정기적으로 수행되는 유지보수비(차륜교환(NWC), 차륜삭정(WC), 임시검수(TI)), 수명 연장 시 안전성 확보를 위하여 실시하는 정밀진단 및 대수선 비용, 그리고 기존차량 폐차에 따른 폐차 수익이 있다.

Table 2. Average maintenance costs and inspection standards by operation distance and year of introduction of the cars.

Types	Average costs per 1 train (Won)	Inspection standards by operation distance	Year of introduction
ES	1,031,095 ⁽¹⁾	1,500km	Cars introduced before 2009
		3,500km	Cars introduced after 2009
LI-3,4	7,713,160 ⁽²⁾	45,000km	Cars introduced before 2009
		60,000km	Cars introduced after 2009
GI-3,4	221,689,414 ⁽³⁾	540,000km	Cars introduced before 2009
		720,000km	Cars introduced after 2009
GI-6,7	272,308,145 ⁽⁴⁾	1,080,000km	Cars introduced before 2009
		1,440,000km	Cars introduced after 2009
NWC	76,498,920 ⁽⁵⁾	-	-
WC	474,688 ⁽⁶⁾	-	-
TI	158,630 ⁽⁷⁾	-	-

(1) Based on night time labor costs, 13 inspectors and 2.5 hours of inspection.

(2) Based on labor costs, 13 inspectors and 20 hours of inspection.

(3) Based on the past data of GI-3,4, including service contract cost, labor cost and material cost.

(4) Based on the past data of GI-6,7, including service contract cost, labor cost and material cost.

(5) Based on the past data of NWC, including service contract cost and wheel cost.

(6) Based on labor costs, 2 inspectors and 8 hours of inspection.

(7) Based on night time labor costs, 2 inspectors and 2.5 hours of inspection.

본 연구에서는 1993년, 1996년 및 1999년에 도입된 인버터제어 전동차 중 표본 5량에 대해 외관검사, 차체 치수검사, 주행장치 결합검사, 부식검사, 전선열화검사, 전동차 노후에 따른 고장 및 유지보수 현황 등을 조사 분석하였다. 또한 본 연구 대상 표본조사와 동일한 인버터제어 차량에 대한 최근 3년간(2012년~2014년) 데이터를 수집하여 평균 고장 및 유지보수 관련 비용을 분석하였다. 수집된 자료와 한국철도공사 전동차 유지보수비 단가(인건비 등)를 기준으로 평균 유지보수비용을 Table 2와 같이 산정하였다. 기본검사(ES)는 편성당 약 1백만원/회 소요되는 반면, 중정비(GI-6,7)의 경우 편성당 약 2.7억원/회 소요되는 것으로 조사되었다. 차륜교환(NWC)은 편성 당 약 76.5백만원/회 소요되며 차륜삭정(WC) 약 47만원/회, 임시검사(TI)는 편성당 약 16만원/회 소요되는 것으로 조사되었다. 이 중 기본검사, 경정비 및 중정비 검수는 전동차 도입연도(Year of introduction) 및 운행 주행거리(Inspection standards by operation distance)에 따라 검수주기가 다르며 검수시행 기준은 Table 2와 같다.

인버터제어 전동차의 정밀진단 수수료는 잔존수명평가를 포함하여 1편성당 약 2억원/회¹⁾ 소요되는 것으로 조사되었다. 단, 수명연장 시기에는 잔존수명평가를 포함하여 모든 평가 비용이 포함되나, 그 이후 5년 주기 수행 시에는 잔존수명평가는 신청자의 선택에 의해 실시한다. 인버터제어 전동차에 대한 대수선은 국내에서 수행된 바가 없다. 다만, 최근 초과 제어 차량인 부산교통공사 1호선 차량에 대한 수명 연장 시 안전성 확보를 위하여 정밀진단 실시 차량에 대한 대수선비용을 참고한다면 1편성당 약 10억원으로 추정된다. 인버터제어 전동차의 편성당 폐차수익은 약 1.3억원으로 조사되었으며 신규차량 구매비용은 최근 전동차 구매계획 단가를 기준으로 1편성당 약 141억원(10량 1편성 기준)으로 조사되었다. 한편 인버터제어 전동차의 성능 및 안전성 향상을 위해 지속적인 구조변경 및 개조(예, ATC 장치 및 전선 등)가 필요하며, 인버터제어 전동차 표본 5량 사례분석과 비용데이터 분석결과 인버터제어 전동차의 수명 연장을 위해서는 1편성당 약 38억원의 추가비용이 발생할 것으로 분석되었다.

3.2 고장 및 안전사고로 인한 부대비용 및 기타 비용

전동차는 주기적인 예방정비와 철저한 준비에도 불구하고 차량의 노후화로 인해 고장(운행장애) 또는 안전사고가 언제든지 일어 날 수 있다. 예를 들어, 2012년 부산도시철도 1호선에서 고압케이블 노후로 인해 열차화재사고가 발생하여 61명의 인적피해(입원환자 4명, 경상자 57명)와 팬터그래프 등 물적 피해가 발생하였다[10]. 일반적으로 전동차는 안정화단계(예, 차량 15년 까지)를 거쳐 노후단계(차량 16년 이후)부터 고장수가 증가한다고 알려져 있으며[6], 고장 또는 안전사고로 인한 정비비용(예방

1) 상태검사(외관, 치수검사), 안전성 검사, 잔존수명평가(차체 및 대차), 서류 및 보고서 등의 비용 포함(서울도시철도공사 내부자료 기준)

정비비 제외)와 수리기간 동안 차량 운행이 정지됨으로 인해 발생하는 운영기관의 영업손실(기회비용), 그리고 운행 중 장애 또는 사고가 발생하면 운행지연은 불가피하며 이로 인한 열차 승객의 시간가치 기회비용이 발생한다. 본 연구에서는 최근 3년간(2012년~2014년) 인버터제어 전동차 데이터와 인버터제어 전동차 표본 5량이 운행 중인 오이도~당고개 구간을 대상으로 비용을 분석하였다.

3.2.1 고장 및 안전사고로 인한 정비비용(예방정비비 제외)

예방정비 외 고장 또는 안전사고로 인한 정비비용 산정을 위해서는 연간 고장횟수와 고장 1건당 단위 정비비용이 필요하며 본 연구에서는 식(1)과 같이 산정하였다. 연간 고장횟수는 평균고장간거리(MKBF; Mean Kilometers Between Failure) 데이터를 활용하였다. 인버터제어 전동차 데이터를 분석한 결과 MKBF가 19,000km로 나타났으며, 이는 누적거리 19,000km 마다 고장 1건이 발생할 수 있다는 의미로서 누적 운행거리에 따른 연간 고장횟수를 산정할 수 있다. 차량시스템의 고장은 차령에 따라 초기단계(최초 4~5년까지), 안정화단계(15년까지), 노화단계(16년 이후)를 거치며, 일반적으로 노화단계부터는 연식, 마모/부식, 피로 등으로 인해 고장의 횟수가 지수형태로 증가한다고 알려져 있다[6]. 수집된 인버터제어 전동차의 운행 장애 데이터를 차령별로 분석한 결과, 차령 16년 이후부터 운행 장애 발생 건수가 증가했으며 증가율이 연간 최소 5% 이상으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 차령 16년 이후부터 고장 발생이 연간 5% 증가하는 것으로 가정하여 고장횟수를 산정하였다. 고장 정비비용은 일반적으로 예방정비비용보다 큰 것으로 알려져 있으며[6], 본 연구에서는 인버터제어 전동차 표본 5량을 운행하고 있는 운영기관의 기본검수 비용의 월 평균 비용(약 722만원)을 참조하여 800만원으로 가정하였다.

$$\text{고장으로 인한 정비비용} = \text{연간 고장횟수} \times \text{고장 정비비용} \quad (1)$$

3.2.2 고장 및 안전사고로 인한 운영기관의 운행(영업)손실

고장이 발생하면 수리기간 동안 차량운행이 정지되므로 이로 인해 운영기관으로써는 영업손실(운행일정 취소로 인한 손해 등), 즉 운행에 대한 기회비용이 발생한다. 차량 1량이 고장 나더라도 1편성 전체가 운행되지 못하므로 편성단위로 비용을 산정할 필요가 있으며 식(2)~식(4)와 같이 운행손실을 산정하였다. 연간 가동률은 연간 평균고장간거리(MKBF)와 연관되어 있다. 목표 가동률(99%)을 기준으로 가동률 1% 감소에 따른 운영기관의 평균 운행손실은 객관적 통계자료의 부족으로 인해 산정하기 어려우며 Han 등 [6]을 참고하여 1,000만원으로 가정하였다. MKBF는 19,000km이며, 고장 횟수가 증가함에 따라 MKBF 및 가동률은 감소하게 된다[6]. 연간 누적주행거리는 약 130,000km, 표정속도는 37.57km/h, MTTR(Meantime to Repair, 평균수리시간)은 4시간으로 가정하였다.

$$MKBF = \frac{\text{연간누적주행거리}}{\text{연간고장횟수}} \quad (2)$$

$$\text{가동률} = \frac{MKBF/\text{표정속도}}{(MKBF/\text{표정속도})+MTTR} \quad (3)$$

$$\text{고장으로 인한 운행손실 기회비용} = (0.99 - \text{가동률}) \times \text{평균운행손실} \quad (4)$$

3.2.3 인적, 물적 피해비용

안전사고는 예기치 못하게 발생할 수 있으며 차량이 노후화 될수록 안전사고의 발생 가능성이 높게 마련이다. 도로·철도 사업의 예비타당성조사 표준지침[11]에서는 철도부문의 교통사고 비용을 사망, 중상, 경상 등의 인적피해와 대물피해를 기준으로 산정하고 있으며, 도시철도의 교통사고 발생비율(건/억인·km)자료를 이용하여 도시철도 교통사고 발생 건수(사망 피해건수는 0.01건/억인·km, 중상 피해건수는 0.05건/억인·km, 경상 피해건수는 0.13건/억인·km, 물적 피해건수는 0.01건/억인·km)와 함께 사고비용 원단위를 제시하고 있다(Table 3). 하지만, 차량 노후화로 인한 인적, 물적피해를 일으키는 도시철도 교통사고에 대한 객관적인 통계자료가 부족하다. 다만 인적, 물적 피해는 식(1)에서 설명한 연간 고장횟수(차령 16년 이후부터 연간 5% 고장발생 증가)보다 작게 설정할 필요가 있으므로, 본 연구에서는 인적, 물적 피해 발생을 일으키는 도시철도 교통사고 건수가 차령 25년 이후부터 연간 3% 증가한다고 가정하였다.

3.2.4 승객의 시간가치 기회비용

운행 중 고장 또는 안전사고로 인해 운행이 지연되면 운영기관에 직접적으로 발생하는 비용 외에 운행 열차에 탑승한 승객들도 지연으로 인해 피해(시간손실)를 입게 된다. 또한 지연은 고장 또는 사고가 발생된 해당 열차뿐만 아니라 후속열차에도 영

Table 3. Personal and property damage costs (10,000 won/case)[11].

Types of costs			Production loss cost	Medical treatment cost	Property damage cost	Administration cost	Sum
Personal damage cost	Death	Excludes PGS	30,695	666	504	70	31,935
		Includes PGS	42,360	919	696	97	44,071
	Serious injury	Excludes PGS	909	424	391	1,293	3,017
		Includes PGS	1,818	849	782	2,585	6,035
	Minor injury	Excludes PGS	95	9	12	253	368
		Includes PGS	102	10	13	274	399
Property damage cost			-	-	284	845	1,129

향을 미쳐 운행지연이 발생한다. 본 연구에서는 식(5)와 같이 사회적 비용을 산정했으며, 연간 고장횟수는 MKBF(19,000km)를 바탕으로 누적 운행거리에 따른 연간 고장횟수를 활용하였다. 피해 편성수는 지연이 운행노선의 어느 지점에서 발생하느냐에 따라 크게 차이가 있을 수 있는 바, 본 연구에서는 편도방향 중간 지점에서 지연이 발생한다고 가정하였다. 분석대상 구간에서는 편도방향 기준으로 침두시에는 약 24~26편성, 비침두시에는 약 14편성이 동시에 운행하고 있으므로, 노선의 중간지점에서 지연이 발생한다는 가정 하에 평균 약 10편성의 열차가 피해를 입는 것으로 가정하였다. 1회 지연운행당 소요시간은 지연의 원인에 따라 큰 편차(몇 분에서 몇 시간까지)가 있을 수 있으나 현재 객관적인 통계자료가 없으므로, 『철도사고 등의 보고에 관한 지침』 [12]의 전동열차 지연운행 정의(10분 이상 지연 운행)과 여러 지연사례를 참조하여 1회 운행 지연당 평균 20분이 소요되는 것으로 가정하였다. 편성당 평균 승객수는 분석 대상구간 각 역별 통과인원(철도통계연보[13])과 역별 운행횟수를 활용하였다. 분석 대상구간의 평균 1회 운행당 역별 통과인원은 약 560명으로 나타나 본 연구에서는 편성당 평균 승객수를 550명으로 가정하였다. 승객 1인당 시간가치는 예비타당성조사 표준지침[11]의 수도권 철도 평균 시간가치를 참조하여 4,867원/인·시간(2014년 기준)으로 설정하였다.

$$\text{고장지연손실비용} = \text{연간고장횟수} \times \text{지연시간} \times \text{피해편성수} \times \text{편성당승객수} \times \text{시간가치} \tag{5}$$

3.3 비용분석

3.3.1 비용분석 개요

앞 절에서 분석한 인버터제어 전동차 유지보수비용 및 기타비용을 기준으로, 1993년~1999년 사이에 도입된 인버터제어 전동차 30편성(1993년 22편성, 1996년 3편성, 1999년 5편성)을 가정하여, 신규차량 구입시기에 따라 서로 다른 대안을 설정하고 수명 주기비용을 고려한 비용 분석을 통해 인버터제어 전동차 노후화에 따른 적정 신규차량 투입 방안을 비교 평가하였다. 분석 및 비용의 기준년도는 2014년이며 분석의 최종년도는 2039년이다. 분석대상 차량의 도입시기가 서로 상이하므로 차령을 구분하고 정기검수에 필요한 주행거리를 바탕으로 유지보수 비용을 산정하였다. 정밀안전진단은 차령이 23년이 되는 해에 실시하고 대수선은 정밀진단 직후에 수행하는 것으로 가정하였다. 신규차량 구매비용은 신규차량 투입 해당년도에 일시불로 지불한다고 가정하였다. 사용연한 25년을 초과한 구차량의 잔존가치는 폐차에 따른 수익과 동일하며, 신규 차량의 잔존가치는 식(6)과 같이 정액법에 의한 감가상각비를 산정하여 잔존가치를 산정하였다.

$$\text{감가상각비} = \frac{(\text{차량구매비} - \text{잔존가치})}{\text{내용연수}} \tag{6}$$

분석에 포함된 비용항목은 신규차량 구매비 및 잔존가치, 차량 유지보수 비용(기본검수, 경정비, 중정비, 차륜교환 등), 기타 비용(정밀진단비, 대수선비, 개조비용 등), 지연 또는 안전사고에 따른 부대비용 및 승객의 시간가치 기회비용이며, 구차량의 구입비용(매몰비용)과 모든 대안에서 공통으로 발생하는 비용(예, 선로사용료, 동력비 등의 운영비용)은 분석에서 제외하였다. 할인율은 현실적인 경제상황을 반영할 수 있는 할인율 3%(1995년~2014년 통계청 3년 만기 국고채 금리의 평균(6.3%)과 동기간 소비자 물가상승률의 평균(3.3%) 차이 반영)을 기본으로, 도로·철도 사업의 예비타당성조사 표준지침에서 활용되는 사회적 할인율 5.5%와 현재와 같은 저성장, 저금리 경제상황을 반영한 할인율 1%(최근 5년간 3년 만기 국고채 금리와 동기간 소비자 물가상승률의 평균 차이가 약 0.9%임)을 반영하여 할인율 변동에 따른 민감도를 분석하였다.

Table 4. Number and year of new trains to buy.

Year to buy	Number of train				
	Scenario-1	Scenario-2	Scenario-3	Scenario-4	Scenario-5
Precision diagnosis and large repair	X	O	O	O	O
2018	22				
2021	3				
2023		10			
2024	5				
2026			10		
2028		10			
2031			12	11	
2033		10		11	22
2034				3	
2036			8		3
2037				5	
2039					5

분석대안은 정밀진단 및 대수선, 사용내구연한, 유지보수 검수주기에 따른 연도별 비용변화, 인버터제어 표본조사 건전성 평가결과, 구매비용 일괄부담 경감을 위한 순차적 도입시기 등을 고려하여 신규차량 도입 시기에 따라 총 5개로 설정하였다(Table 4). 대안 1은 수명 연장 없이 신차 구매, 대안 2는 정밀진단 및 대수선 후 2023년부터 순차적 신차 구매, 대안 3은 정밀진단 및 대수선 후 2026년부터 순차적 신차 구매, 대안 4는 정밀진단 및 대수선 후 2031년부터 순차적 신차 구매, 대안 5는 정밀진단 실시 후 잔존수명이 15년 연장된다고 설정하였다. 따라서 신규차량 구매비용, 검수주기에 따른 유지보수비용(기본검수, 경정비, 중정비 등)과 노후화에 따른 부대비용 및 사회적비용 항목은 모든 대안에 공통적으로 고려되었으며, 차량의 수명연장을 위해서 반드시 필요한 정밀진단 및 대수선 비용은 대안 1(수명연장 없음)을 제외한 대안 2~대안 5에만 적용되었다.

각 대안에 대한 자세한 설명은 다음과 같다. 기본적으로 수명 연장 없이 신차를 구매하는 경우(대안 1)과 정밀진단 및 대수선을 거쳐 잔존수명이 15년 연장되는 경우(대안 5)를 설정하였다. 다만, 두 대안 모두 운영기관 입장에서는 대량의 신규차량을 일괄적으로 구매해야하는 재정적 부담이 있다. 따라서 두 시기 사이에 순차적으로 신규차량을 구매하여 일괄부담을 경감할 수 있는 대안을 추가적으로 분석할 필요가 있다. 우선, 전동차 1차 축상스프링, 2차 고무스프링, 차륜 등 많은 핵심장치들은 약 15년 주기로 교환해야 하므로 1993년 도입된 인버터제어 전동차 22편성의 경우 30년이 되는 2023년이 교환주기가 된다. 따라서 2023년부터 신규차량을 구매하되, 일괄구매 부담을 경감하기 위해 2023년부터 10편성씩 5년 단위로 순차적으로 신규차량을 구매하는 경우를 대안 2로 설정하였다. 둘째, 유지보수를 위한 정기검수는 검수주기가 서로 상이하여 연도별로 유지보수비용이 상이하며 특정 연도에 비용이 피크치가 발생하게 된다. 앞 장에서 조사된 유지보수비용의 LCC를 분석한 결과 2026년에 유지보수 비용이 피크치가 도달 할 것으로 나타났다. 따라서 2026년부터 신규차량을 구매하되 일괄구매의 부담을 덜기 위해 5년 단위로 순차적으로 차량을 대체하는 경우를 대안 3으로 설정했다. 다만 인버터제어 전동차의 수명이 40년을 넘지 않도록, 1993년 도입분 22편성 중 10편성에 대한 신규차량은 2026년에 1차적으로 도입하고, 1993년 도입분 12편성에 대한 신규차량은 2031년에, 그리고 나머지 8편성을 2036년에 구매하는 것으로 설정했다. 셋째, 인버터제어 차량 5량 표본조사 결과, 대차 프레임의 잔존수명이 13년 정도 예측되므로, 대안 4에서는 1993년 도입 차량 중 정밀진단 결과에서 건전성이 낮은 차량은 차량사용연한을 38년을 기준하여 2031년에 11편성을 1차적으로 교체하고, 정밀진단 결과에서 건전성이 좋은 11편성은 사용연한 40년 기준으로 하여 2033년에 11편성을 2차 교체하는 대안이다. 그리고 1996년 및 1999년에 도입한 차량은 각각 2036년 및 2039년에 신규차량으로 교체하는 방안이다.

3.3.2 비용분석 결과

할인율 3%를 기준으로 5개 대안에 대한 NPV(순현재가치) 분석 결과를 Table 5에 정리하였다. 만약 고장 및 사고로 인한 부대비용과 사회적 비용을 고려하지 않는다면 순현재가치를 기준으로 대안 5, 대안 4, 대안 3, 대안 1, 대안 2의 순으로 유리한 것으로 분석되었다. 하지만, 부대비용과 사회적 비용을 함께 고려한다면, 대안 5, 대안 4, 대안 1, 대안 3, 대안 2의 순으로 나

Table 5. Results of the economic analysis.

Scenarios	NPV(Net present value)							Total
	Costs of new trains		Maintenance cost	Other costs ⁽¹⁾	Sub-total	Additional cost and social cost ⁽²⁾	Accident cost ⁽³⁾	
	Purchase	Residual value						
Scenario-1	362,461	-36,333	61,679	-3,434	384,373	82,123	2,948	469,444
Scenario-2	281,693	-105,973	77,379	132,286	385,385	108,870	3,122	497,377
Scenario-3	260,133	-127,318	78,525	134,581	345,921	120,315	3,217	469,453
Scenario-4	241,432	-146,262	83,255	134,166	312,591	131,975	3,319	447,884
Scenario-5	232,650	-156,401	84,086	134,249	294,584	138,553	3,380	436,517

- (1) Includes precision diagnosis, large repair, remodeling, car scraping costs.
- (2) Includes additional cost and social cost as a result of vehicle failure and assumes that it is increased by 5% annually after 16 years of vehicle.
- (3) Based on data from KDI [11] and assumes that it is increased by 3% annually after 25 years of vehicle.

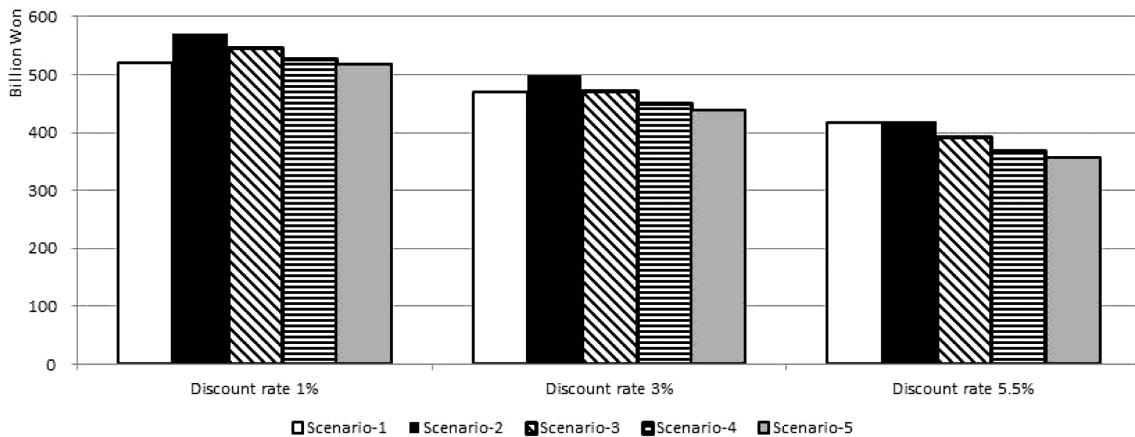


Fig. 1. Comparison of NPV by different discount rates.

타났다. 수명연장을 하지 않는 대안 1의 경우, 신규차량을 일괄 구매해야하는 부담이 있으나, 차량 안전성 및 성능 향상을 위한 차량 개조비용을 절감할 수 있고 빠른 시기에 신규 차량을 도입함으로써 유지보수 및 인력 비용 감소효과(대안 5 대비 224억 원 절감)가 있으며, 정밀진단비 및 대수선비가 필요 없는 장점이 있다. 대안 2-대안 4의 경우, 신규차량 구매비용의 일괄부담을 경감할 수 있는 장점이 있다. 15년 수명을 연장하는 대안 5의 경우 순현재가치 비용이 4,365억원으로써 모든 대안 가운데 NPV가 최소로 나타나 경제적으로 가장 유리한 대안으로 분석되었다. 하지만, 인버터제어 전동차 정밀진단 표본조사 결과, 대차 프레임의 수명이 38년(설계수명 25년 이후 잔여수명 13년 가능)으로 평가되어, 15년을 연장하여 사용하기 위해서는 대차프레임을 10년 연장사용 후 안전성 및 건전성을 철저히 평가할 필요가 있다. 또한 대안 5는 신규차량 일괄 대량구매로 인한 예산 확보가 쉽지 않은 단점이 있다. 어느 대안이든 차량 구매시기가 늦춰질수록 노후차량 핵심부품 조달이 어렵거나, 원인불명 사고 발생 가능성이 높고 그로 인해 부대비용 및 사회적 비용이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 할인율 3% 기준으로 대차프레임 38년 잔존수명을 감안한다면, 대안 4가 NPV면에서 가장 유리한 것으로 분석되었다.

한편, 미래사회에 대한 불확실성은 언제나 존재하며 할인율 변동에 따른 비용의 민감도를 분석할 필요가 있다. 할인율 변화에 따른 NPV의 민감도 결과를 살펴보면, 동일 대안을 비교할 경우 할인율이 높을수록 현재가치는 저하되어 총 순현재가치 비용이 작아지는 것을 볼 수 있다(Fig. 1). 할인율이 1%일 때, 대안 1과 비교하여 대안 2는 약 515억원 증가, 대안 3은 약 260억원 증가, 대안 4는 약 59억원 증가인 반면, 대안 5는 약 19억원 감소하는 것으로 나타났다. 신규차량 구매시기의 극단적인 시나리오인 대안 1(수명연장 안함)과 대안 5(15년 수명연장)를 할인율 3% 일때와 할인율 1% 일때를 서로 비교해보면, 할인율 3% 시 대안 1과 대안 5의 NPV 차이가 약 329억원인 반면, 할인율 1% 시 대안 1과 대안 5의 NPV 차이가 18억원에 불과하다. 따라서, 할인율이 낮을수록 차량구매시기에 대한 비용 민감도가 작게 나타나며, 특히 현재와 같은 저성장, 저금리 경제상황이 지속되고 차량 노후화에 따른 원인불명 안전사고를 미연에 방지하기 위해선 신규차량 구매시기를 앞당기는 것이 유리할 수 있다.

특히, 할인율 1% 가정 시, 대안별 경제적 우선순위는 대안 5, 대안 1, 대안 4, 대안 3, 대안 2의 순으로 나타났다. 따라서, 대차 프레임 잔여수명(최대 13년 연장)을 감안하여 대안 5를 제외한다면, 수명 연장이 없는 대안 1이 가장 유리한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

도시철도 운영기관은 전동차의 설계수명이 도래하기 전에 잔여수명을 합리적으로 산정하여 신규차량의 구매 시기를 결정해야 한다. 본 연구에서는 기존의 전동차 수명주기분석 기법인 LCC분석의 한계를 극복하고자 고장 및 안전사고로 인해 운영기관이 추가적으로 부담해야 하는 부대비용과 승객의 시간가치 기회비용 등을 함께 고려하여 전동차의 효율적 활용을 위한 방안을 도출하였다. 비용분석을 위해 인버터제어 전동차 표본 5량을 조사 분석하고 최근 3년간 비용관련 데이터를 수집 및 분석하였다. 도입시기가 서로 다른 인버터제어 전동차 30편성을 기준으로 신규차량 구매시기에 따라 분석대안을 5개로 설정하고 각 대안에 대한 비용을 비교분석하였다. 비용분석에는 차량 구매비용 및 잔존가치, 유지보수비용, 기타비용(정밀진단, 대수선, 개조비용)과 함께 차량 노후화에 따른 고장 및 안전사고 발생으로 인한 부대비용 및 사회적비용을 포함하여 분석하였다.

본 연구에서는 할인율 1%, 3%, 5.5%에 대한 대안별 순현재가치를 비교분석했으며, 할인율에 따라 대안의 우선순위가 바뀔 수 있는 것으로 나타났다. 현실적인 경제상황을 반영할 수 있는 할인율 3%를 기준으로 순현재가치를 대안별로 비교하면, 대안 5(15년 수명연장)가 비용면에서 가장 유리한 것으로 나타났으나, 인버터제어 전동차 정밀진단 표본조사에서 대차 프레임의 잔존수명이 38년(설계수명 25년 이후 잔여수명 13년)으로 평가되었으므로 대안 5를 제외할 필요가 있으며, 따라서 대안 4(정밀진단 및 대수선 후 2031년부터 순차적 신차 구매)가 경제적으로 가장 유리한 것으로 나타났다. 그 다음으로 대안 3(정밀진단 및 대수선 후 2026년부터 순차적 신차 구매), 대안 1(수명 연장 없이 신차 구매), 대안 2(정밀진단 및 대수선 후 2023년부터 순차적 신차 구매)의 순으로 분석되었다.

세월호 사고 이후 전국민적으로 안전사고에 대한 관심이 고조되고 있으므로 운영기관에서는 노후차량으로 인해 발생할 수 있는 운행장애(고장) 및 안전사고로 인한 부대비용 및 운행지연으로 인해 승객에게 불편을 주는 사회적비용 발생 가능성을 면밀히 분석할 필요가 있다. 신규차량 도입이 지연될수록 안전성 확보를 위한 핵심장치 교환 비용이 증가할 가능성이 높으며 대량의 차량을 일괄 구매하기에는 발주시기에 맞춰 예산의 확보 어려움도 예상된다. 본 연구에서는 기존 LCC 연구에서 고려하지 못했던 신규차량 구매비용의 일괄부담의 문제, 노후차량 개선을 위한 구조변경 및 개조비용, 노후화에 따른 원인불명 안전사고 발생가능성 및 이로 인한 부대비용과 사회적 비용을 고려하여 대안을 검토 및 분석하였다. 본 연구를 통해 부대비용과 사회적 비용의 포함여부 및 할인율에 따라 대안의 경제적 우선순위가 변동될 수 있는 결과를 보여주었다. 이는 향후 철도차량 잔여수명 분석 방법론과 차량수급 중장기 경영계획 수립을 위한 의사결정에 큰 시사점을 줄 것으로 판단된다. 한편, 안전사고에 대한 관심이 고조되고 있는 사회적 분위기와는 달리, 신규차량 도입시기 의사결정분석과정에서 안전사고를 어떻게 고려해야 하는지에 대한 명확한 지침이 없는 게 현실이다. 따라서 노후화에 따른 안전사고 등에 의한 부대비용 등을 반영할 수 있는 객관적 통계자료를 축적하고 비용을 추정할 수 있도록 추가적인 연구도 필요하며, 정책적 및 경제적 판단기준을 마련하여 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 통계자료, 최근 3년간 인버터제어 차량 데이터, 표본 5량에 대한 사례분석을 바탕으로 비용을 분석했으나, 부대비용 및 기타 비용 산정에 있어 객관적 통계자료 및 근거 데이터의 부족으로 인해 몇 가지 가정에 의존한 한계가 있다. 향후 충분한 데이터가 확보된다면 추가적인 분석도 필요할 것으로 보인다. 또한 본 연구에서 계량화 하지 못했던 추가적인 편익(신규차량 조기 도입에 따른 마케팅 효과 및 이미지 향상, 쾌적성 향상으로 인한 수요증대 효과, 폐차 대상 차량을 다양한 방법을 통해 새로운 가치창출)이 있으며 이에 대한 계량화 연구도 수행되기를 기대한다.

References

- [1] S.Y. Chung, W.Y. Lee (2012) Estimation of the life-span for urban rolling stock through LCC analysis (focused on Seoul Metro), *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(5), pp. 508-516.
- [2] S.M. Park, S.T. Kim (2009) A research on the economical life-span setting of rolling stock based on the LCC(Life Cycle Cost) analysis, *Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, pp. 1-14.
- [3] S.M. Park (2009) Analysis to be used for the life cycle costs calculation of rolling stocks for EMU, *Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, pp. 1-7.

- [4] 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 of the Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 88-94.
- [5] Y.S. Lee, J.O. Kim, H.C. Kim, D.U. Jang (2009) A study on modeling of life cycle cost for magnetic levitation train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(6), pp. 1076-1080.
- [6] S.Y. Han, S.K. Hong, C.S. Ha (2005) Analysis of life-cycle cost for urban transit system using RAM, *IE Interfaces*, 18(4), pp. 477-484.
- [7] K.W. Chung, Y.S. Jeon, J.Y. An, C.S. Kim, J.D. Chung (2009) Verification of life-cycle cost for the urban railway vehicle, *Conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, pp. 1-7.
- [8] J.W. Kim, K.W. Chung, J.S. Park, J.D. Chung (2010) A life cycle cost model and procedure for the acquisition of rolling stocks, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), pp. 257-263.
- [9] MOLIT (2010) A study of service life and precise diagnosis of railway vehicles, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, pp. 1-172.
- [10] ARAIB (2013) *Railroad accident investigation report: Busan Transportation Corporation Subway Line 1*, Aviation and Railway Accident Investigation Board, ARAIB R13-07.
- [11] KDI (2008) *General guidelines for preliminary feasibility studies(Road and Railroad)*, Public & Private Infrastructure Investment Center, Korea Development Institute.
- [12] MOLIT (2010) A guideline for the report on railway accidents, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
- [13] Achieved at www.korail.com (Accessed 14 November, 2014).

(Received 19 May 2015; Revised 1 July 2015; Accepted 15 September 2015)

Kwang-Sub Lee : leeks33@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Chan Woo Lee : cwlee@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Keun-Yul Yang : yul88@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Jae Hong Min : jhmin@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Jong Jin Shin : jin0513@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Railroad Museum Road, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea