

8200호대 전기기관차 주변환장치 LCC 비교 분석

Life Cycle Cost Comparative Analysis for Main Conversion System in 8200 Series Electric Locomotive

김 완 일* · 창 윤 우** · 김 동 만* · 김 재 문†

(Wan-il Kim · Yoon-Woo Chang · Dong-Man Kim · Jae-Moon Kim)

Abstract - Parts and units of 8200 series electric locomotive are aging, but and source technology is not secured. As a results, maintenance costs are increasing steadily due to using expensive substitute parts. Therefore, various studies have been conducted to reduce maintenance costs. In this paper, the life cycle cost(LCC) of the developed and conventional products were compared and analyzed about main conversion system in 8200 Series electric locomotive. As a result of analysis, the material cost was the highest in the conventional product among the various item costs. On the other hand, it is confirmed that preventive cost was the highest among the costs about the developed product.

Key Words : 8200 series electric locomotive, Life cycle cost, Main conversion, IEC 60300-3-3, Preventive cost

1. 서 론

철도는 대중교통 중에서도 많은 관심을 받으며 대중이 부담 없이 편리하게 이용할 수 있는 교통수단의 중심으로 자리를 잡고 있다. 또한, 높은 에너지 효율과 친환경적이며 수송력이 높고 신속함을 겸비한 국제 경제의 중요한 역할을 이루고 있다. 따라서 철도의 안전성은 중요시되며 보다 더 나아가기 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다. 2003년부터 도입되어온 8200호대 전기기관차의 주요 부품은 상호호환 문제로 인해 대체로 수입되어 사용하고 있다. 그러나 주요 부품은 장기간 사용에 따른 노후화로 제품이 단종되는 추세이며 대체 부품은 비용이 증가하고 있는 실정이다. 따라서 전기기관차의 유지보수에 대한 비용은 지속적으로 증가하고 있다. 이로 인해 국내에서는 주변환장치의 유지보수비용 절감을 위해 다양한 연구가 이루어지고 있으며 주요 부품에 대한 국산화 개발 연구도 진행 중에 있다.

본 논문에서는 8200호대 전기기관차 주변환장치 국산화개발에 따른 수명주기비용(Life Cycle Cost, 이하 LCC)을 분석하였다. 신뢰도 높은 LCC 분석을 위하여 8200호대 전기기관차의 BOM(Bill of Material)을 기준으로 PBS(Product Breakdown Structure, 이하 PBS)를 구성하였고 적합한 수명주기비용 평가모형을 선정하고

주변환장치의 기존품과 개발품에 대해 부품별 LCC 분석에 대한 결과를 비교하였다. 이를 위해 재료비 및 유지보수비 등에 따른 비용별 합계를 분석하고 할인율 등을 적용해서 전기기관차의 내구연한 30년 주기동안 실질적인 부품별 수명주기비용을 산출하였다. 또한 주변환장치의 기존품 및 개발품에 대해 수명주기비용(LCC)을 누적하였을 때를 비교하여 내구연한 동안 효과적인 비용 절감방안에 대한 방향성을 제시하였다.[1-3]

2. 비용평가모형 및 PBS

본 논문은 KS A IEC 60300-3-3규격을 바탕으로 8200호대 전기기관차에 가장 적합한 비용평가모형을 개발하고 정확한 정비방법 산출을 위하여 8200호대 전기기관차의 유지보수 매뉴얼을 준하여 LCC 분석을 수행하였다.

2.1 비용평가모형

LCC분석은 방법에 따라 급격한 차이를 나타낼 수 있다. KS A IEC 60300-3-3은 일반적으로 수명주기비용에 대해 다루고 있으며 분석 단계에 대해 체계적으로 기술되어 있다. 하지만 일반적인 모델에 철도의 특성을 포함시키는 것은 어려움이 있으므로 주변환장치의 특성에 맞는 비용평가모형을 식 (1)과 같이 설정하였다.

$$LCC = Cost_{(Preventive Maintenance)} + Cost_{(Corrective Maintenance)} + Cost_{(Operation)} \quad (1)$$

예방정비비(Preventive Maintenance)는 매뉴얼에 준하여 사전에 정해진 정비주기와 이미 규정된 범위 내에서의 고장 확률감소

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation Policy Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

** Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

Received : October 5, 2018; Accepted : November 29, 2018

에 대한 내용을 이루며 장비기능 저하를 방지하기 위한 정비를 나타낸다. 고장정비비(Corrective Maintenance)는 결함을 인식한 후 기기의 필요한 기능을 다시 정상 수행할 수 있는 상태로 되돌리기 위한 정비로 가장 단순한 형태의 정비이다. 운영비(Operation)는 전기기관차 운행에 따른 주변환장치에 소요되는 비용으로 주로 정비시 사용되는 차량기지 운영비 등을 의미한다. 표 1은 세부항목에 따른 비용 산정방식을 나타낸다.

표 1 수명주기비용 산정을 위한 비용 산정방식

Table 1 Cost estimation method for LCC

세부항목	비용 산정방식
운영비	<ul style="list-style-type: none"> · 편제 인원/설비 투입 MH에 의한 추정 · 차량 유지보수에 소비되는 전력사용 · 유지관리비 투입 MH에 의한 추정
유지보수비	<ul style="list-style-type: none"> · 부품별 정비주기 매뉴얼에 의한 추정 · 정기검수 투입 MH 정보에 의한 추정 · 고장관리정보에 의한 추정 · 부품별 RAMS 정보에 의한 추정 · 내용연수에 따른 교체비
기타비용	<ul style="list-style-type: none"> · 기타 운영과 유지보수에 따른 공구비 · 소요 인원/설비 투입 MH에 의한 추정

2.2 주변환장치의 PBS 분류체계

주변환장치의 LCC 분석에서 PBS는 가장 기본적인 방법이자 핵심 요소이다. 일반적인 PBS의 구조는 TOP DOWN 형식으로 제품의 수리나 조립과정을 중심으로 사용되는 부품들을 트리(Tree) 구조로 나타낸다. 그림 1은 8200호대 전기기관차의 주변환장치에 대한 PBS 분류체계를 구분하기 위한 트리구조를 보여준다. 이는 대분류, 중분류, 소분류로 시스템의 전체 형상을 결정하고 분류마다 어떠한 구성품이 사용되는지를 고려하기 위한 단계이다.

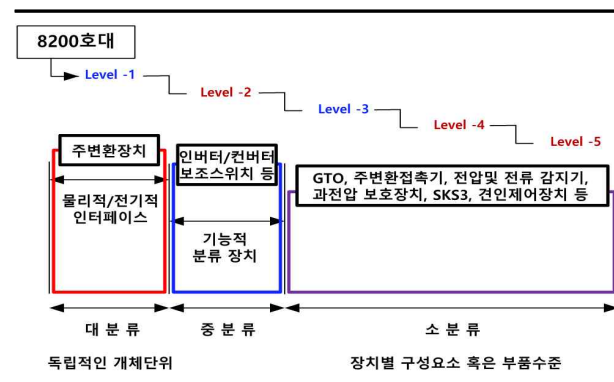


그림 1 PBS 분류체계
Fig. 1 PBS Classification of System

그림 2는 PBS 분류체계에 근거한 8200호대 기존품 주변환장치에 대한 PBS를 보여준다. 철도차량에 적용이 가능한 수준으로 Level 1과 Level 2를 정의하였다. Level 1은 물리적/전기적 인터

페이스 단계, Level 2는 기능적 특성 및 독립적으로 정의되는 단계로 분류하였다. Level 3과 4는 전기기관차의 형식 및 구조에 따라 달라질 수 있으므로 부품의 상세한 분류체계 또는 장치별 구성요소로 분류하였다.

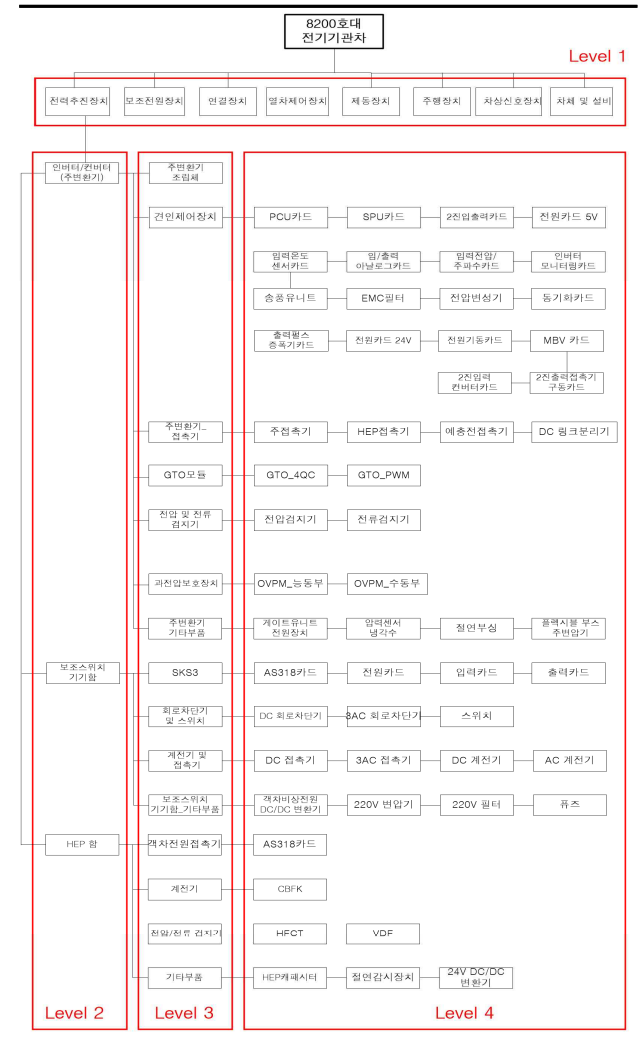


그림 2 8200호대 전기기관차 주변환장치(기존품) PBS
Fig. 2 PBS of Main Conversion System (conventional) in 8200 Series Locomotive

그림 3은 8200호대 개발품 주변환장치에 대한 PBS를 나타낸다. 기존품에 비해 개발품 PBS가 Level 단계가 축소되었음을 알 수 있다. 이는 초기 도입비용으로 사용되는 재료비를 절감하기 위하여 기존품 Level 3과 개발품 Level 2를 같은 수준으로 하였으며, 기존품 주요 부품 단종에 따라 GTO모듈을 IGBT로 대체하여 인버터, 컨버터 및 HEP장치로 분리 개발하였다. 그리고 전원카드 5[V], 24[V]를 POWER(PWS27)로 대체하는 등 유사기능을 갖는 부품들을 하나의 부품으로 간소화 하였으며 교체시기가 비슷한 부품들도 하나의 모듈로 적용하였다.

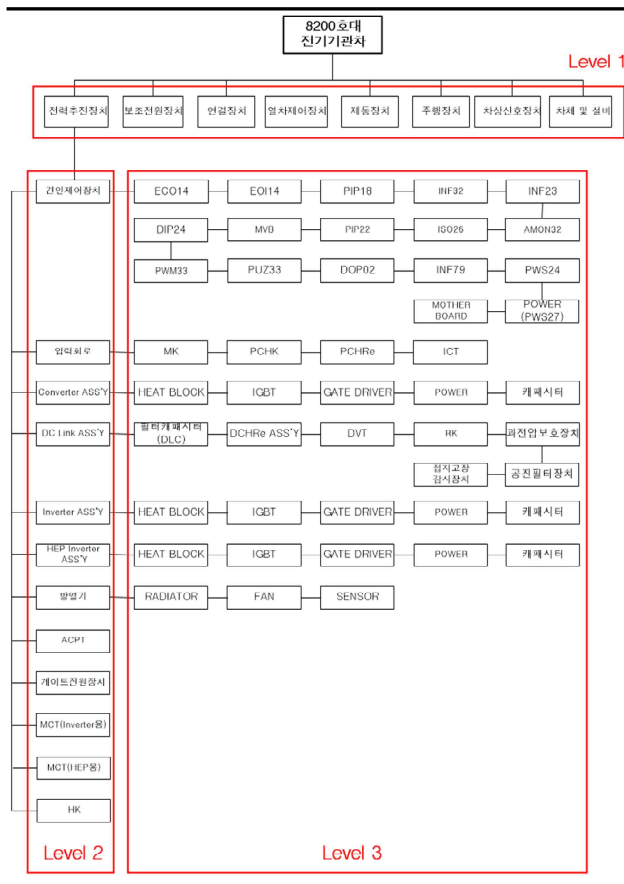


그림 3 8200호대 주변환장치(개발품) PBS
 Fig. 3 PBS of Main Conversion System(development) in 8200 Series Locomotive

3. 기존품과 개발품에 대한 주요 부품별 LCC 분석

LCC 비교 분석은 재료비, 경정비(Limited Inspection, LI-3, 8), 중정비(General Inspection, GI-3, 6, 9, 10), 운영비 및 고장 정비비의 분석 결과를 바탕으로 분석하였다. 본 절에서는 8200호대 전기기관차 주변환장치 기존품과 개발품의 주요 부품 중 GTO모듈, 견인제어장치, 주변환기 접촉기, 계전기 및 접촉기에 대해서 비교 분석하였다. 분석 항목으로는 그림 4의 범례에 준해 실제 부품의 수명 주기를 고려하였으며, 할인을 등을 적용하여 30년 동안 비용을 추정하였다. 이를 통해 부품별 수명주기비용과 비용별 합계를 산출하였다.[4]

3.1 GTO 모듈

기존품 Level 3에 위치한 GTO 모듈은 전력용 반도체를 적용한 인버터와 컨버터 등을 나타낸다. 따라서 개발품 Level 2에 위치한 컨버터(Converter Ass'y), 인버터(Inverter Ass'y) 그리고 HEP inverter ass'y와 LCC를 비교한다. 개발품은 기존품에 비해 세부적

으로 분리하여 사용함으로써 각각 구성품별 교체가 가능하여 운용에 따른 유지보수 비용을 절감할 수 있다. 그림 4는 기존품 GTO 모듈과 이에 상응하는 개발품에 대한 LCC 분석을 나타낸다.

LCC 분석 결과 기존품의 경우 재료비가 전체비용의 72.2%를 차지하였다. 하지만 재료비는 주변환장치를 초기 도입당시 필수적으로 사용되는 비용으로 LCC 절감 측면에서 영향을 미치지 않는다. 따라서 20.7%의 비중을 차지하는 고장정비비를 최소화하는 것이 개발품에 대한 LCC 절감 방안 중 하나의 요소가 될 수 있다. 그 외 LI-3 3.3%, 운영비 2.3%, LI-8 0.9%, GI-6 0.12%, GI-3 0.5%, GI-9 0.03%, GI-10 0.01%의 비중을 차지한다. 개발품의 경우 경정비 LI-3이 57.9%로 가장 높은 비중을 차지하였다. 다음으로 LI-6이 14.2%로 높았으며 기존품에서 가장 비중이 높았던 재료비는 9.8%를 차지하였다. 이는 해외에서 구입하여 운용되고 있는 기존품에 대한 한계를 IGBT 소자 등을 적용한 컨버터, 인버터 및 HEP 장치를 개발하면서 재료비 절감을 하였기 때문이다. 그 외 중정비 GI-3 9.81%, 운영비 3.07%, GI-6 2.81%, 고장정비비 1.31%, GI-9 0.7%, GI-10 0.33%의 비중을 차지한다.

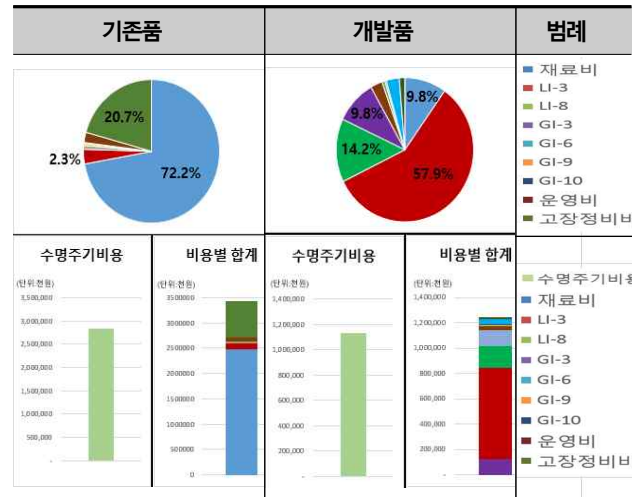


그림 4 GTO 모듈 LCC 분석
 Fig. 4 LCC analysis of GTO module

3.2 견인제어장치

견인제어장치는 전기장치 중 하나로써 차량 운행에 있어 직접적인 영향을 미치는 주요 장치이다. 중앙제어장치(Communication Control Unit, CCU)와 통신 고장이 발생할 때 차량을 보호하기 위하여 전원이 차단되고 기동을 정지시키는 기능을 갖으며 안전성을 향상시키기 위하여 유지보수가 요구되고 있는 장치 중 하나이다. 그림 5는 견인제어장치의 기존품과 개발품에 대한 LCC 분석을 나타낸다.

LCC 분석 결과 견인제어장치는 기존품은 76.2%를 차지하고 개발품은 36.4%로 주요부품 중 재료비가 상대적으로 높은 편에 해당된다. 그러나 GTO 모듈과 마찬가지로 기존품인 경우 재료비는 초기 도입비용이므로 LCC 절감에 영향을 미치지 않는다. 따

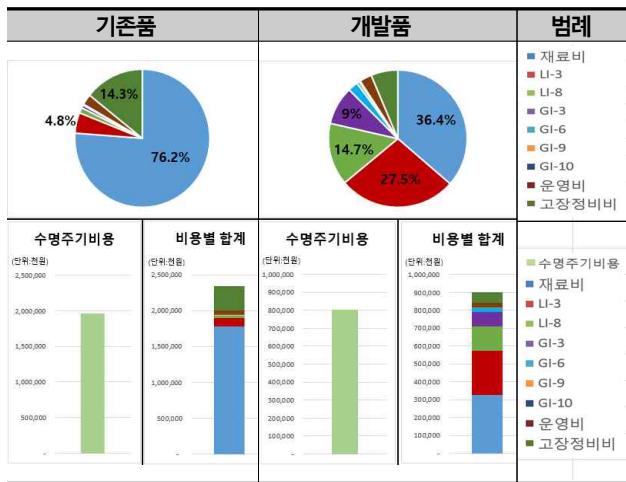


그림 5 견인제어장치 LCC 분석
Fig. 5 LCC analysis of Traction Control Unit

라서 14.3%의 비중을 차지하는 고장정비비를 절감하는 방법을 통해 개발품 LCC 절감을 구현할 필요가 있다. 그 외 LI-3 4.8%, 운영비 2.5%, LI-8 1.28%, GI-3 0.71%, GI-6 0.18% 등의 비중을 차지한다. 개발품인 경우 재료비 다음으로 높은 경정비 LI-3이 27.5%를 차지하고 LI-6은 14.7%를 보였다. 그 외 GI-3 9.02%이고 기존품에서 높은 편에 속했던 고장정비비는 6.26%, 운영비 2.86%, GI-6 2.36%, GI-9 0.63%, GI-10 0.27%의 비중을 차지한다.

3.3 주변환기 접촉기

주변환기 접촉기는 기존품에서 주접촉기, HEP접촉기, 예종전 접촉기 및 DC링크브리로 이루어져 있다. 전기장치 중 하나로 전 자력에 의해 주회로 전기를 공급 및 차단하는 장치이다. 전자식 으로 제어되는 개폐기로 대전류를 개폐하는 경우가 많기 때문에

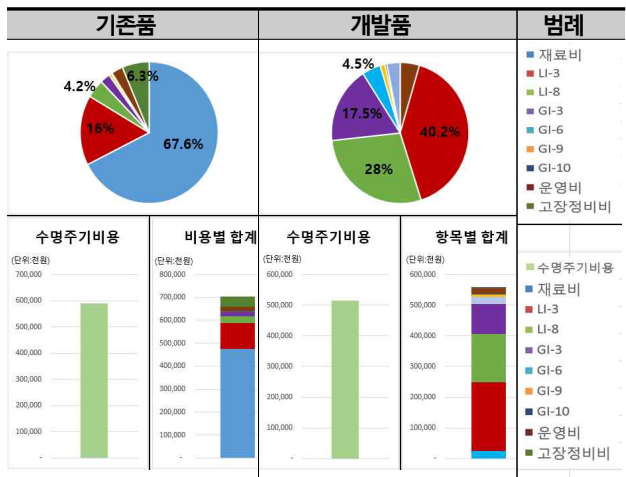


그림 6 주변환기 접촉기 LCC 분석
Fig. 6 LCC analysis of main conversion contactor

소호장치를 갖춘 것이 많으며 실질적으로 유지보수가 많이 이루어지고 있는 장치 중 하나이다.

그림 6은 기존품 주변환기 접촉기와 개발품 HK에 대한 LCC 분석을 나타낸다. LCC 분석결과 마찬가지로 재료비가 67.6%로 가장 높은 비중을 차지함을 확인할 수 있다. 다음으로 LI-3 16%, 고장정비비 6.33%, LI-8 4.24%, 운영비 2.73%, GI-3 2.36%, GI-6 0.58%, GI-9 0.15%, GI-10 0.06%으로 범례별 수명 주기비용을 확인하였다. 개발품은 LCC 분석결과 LI-3이 40.2%로 가장 높은 비중을 차지하였다. 다음으로 LI-8 28%, GI-3 17.5%, 재료비 4.5%, GI-6 4.3%, 운영비 3.1%, GI-9 1.1%, GI-10 0.5%의 비중을 차지한다.

3.4 계전기 및 접촉기

계전기 및 접촉기는 주변환기 접촉기와 마찬가지로 주회로의 전기를 공급 및 차단할 수 있는 장치이며 유지보수가 많이 이루어지는 장치 중 하나이다.

그림 7은 기존품 구성 중 계전기 및 접촉기와 개발품 입력회로에 대한 LCC 분석을 나타낸다. 기존품 LCC 분석결과 LI-3이 53.23%로 가장 높은 비중을 차지함을 확인할 수 있었다. 다음으로 재료비 16.88%, LI-8 14.13%, GI-3 7.86%, 운영비 2.84%, 고장정비비 2.73%, GI-6 1.95%, GI-9 0.51%, GI-10 0.21%의 비중을 차지한다. 개발품은 LI-3이 39.08%로 가장 높은 비중을 차지함을 확인할 수 있었다. 다음으로 LI-8 27.9%, GI-3 18.18%, 재료비 4.41%, GI-6 4.76%, 운영비 3.12%, GI-9 1.27%, 고장정비비 0.74%, GI-1 0.54%의 비중을 차지한다.

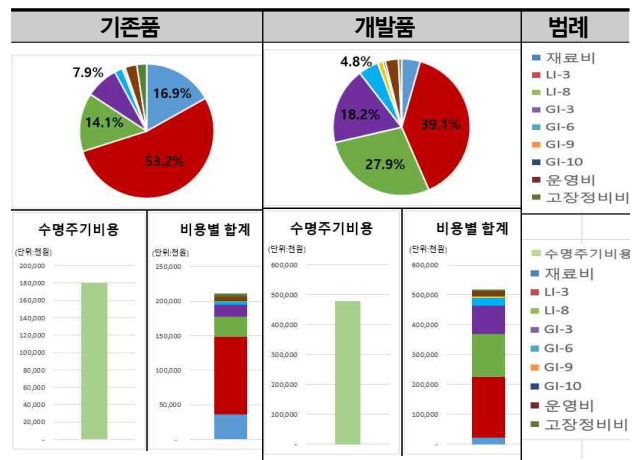


그림 7 계전기 및 접촉기 LCC 분석
Fig. 7 LCC analysis of relay and contactor

4. 기존품 및 개발품 LCC 비교 분석

그림 8은 견인제어장치의 기존품 및 개발품 LCC에 대해 항목 별로 비교한 그래프를 나타낸다. 그림 4~그림 7에서 주요 부품의 재료비가 기존품 대비 개발품이 크게 감소함을 확인할 수 있

다. 이는 LCC 분석 중 큰 비중을 차지하는 재료비를 절감하기 위해 개발품에 사용되는 부품을 소형 경량화하고 기존품 Level 3을 개발품에서는 Level 2로 대체하는 등 다수의 부품을 호환 가능한 단일 부품으로 기능구현을 도모함으로써 소비비용을 최소화하였다.

한편 경정비와 중정비는 8200호대 유지보수 매뉴얼, 지침 및 체계를 준하여 수행하는 작업으로 기존품과 개발품이 동일해야 하지만 본 논문에서는 개발품이 기존품보다 더 높은 비중을 차지한다. 이는 기존품의 부품 교체와 간소화를 위한 단일부품 대체로 인해 더 많은 정비과정을 포함하게 되므로 전체적인 유지보수 비용이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 수명주기비용 절감방안에 있어 기존품은 고장정비비가 주요 요소로 신뢰성을 향상시켜 고장률을 최소화 하는 것이 가장 효율적인 방법이라고 판단된다. 개발품인 경우는 예방정비비(LI-3~GI 10)가 주요 절감요소로 유지보수 매뉴얼, 지침 및 체계의 범위를 보완할 필요가 있다. 이를 통해 회기한도를 늘려 정비횟수를 재정립하고 이에 적절한 유지보수 작업이 필요할 것이라 판단된다.

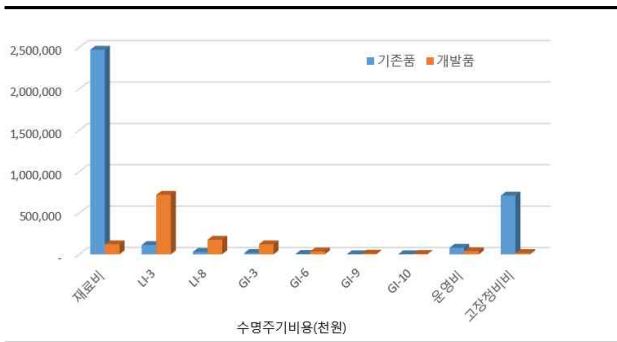


그림 8 견인제어장치 LCC 비교 분석
Fig. 8 LCC comparative analysis of Traction Control Unit

4.1 주요부품 대비 LCC 분석

그림 2와 그림 3에서 보듯이 기존품과 개발품의 PBS가 상이한 부분이 존재하므로 주요부품에 대하여 비교 분석을 하였다. 비교 분석 대상은 PBS에서 기능적 특성 및 독립적으로 정의되는 Level 2 단위의 주요부품을 기준으로 하였으며 각 부품별 비용차이를 확인하였다. 그림 9는 주요부품에 대한 LCC 비교 분석 결과를 나타낸다. 기존품 대비 개발품 비용이 전체적으로 감소함을 알 수 있다. 특히 GTO 모듈과 견인제어장치 부분에서는 절반 이상의 비용을 절감하는 것을 확인하였다. 이는 부품 단종으로 인한 보수품 가격 상승과 수입 의존도가 상당히 높은 기존 부품과는 달리 개발품의 경우 최신 부품들을 사용하므로 부품 단가 절감과 용이한 보수품 확보 및 개발품의 신뢰성 증가에 따른 평균 교체 주기의 증가 등이 주 요인으로 분석된다. 또한 주변환기 접촉기도 기존품 대비 개발품 수명주기비용이 감소함을 알 수 있다. 반면 계전기 및 접촉기의 경우 개발품 수명주기비용이 더 높은 것으로 분석되었으며, 이는 기존품 대비 개발품에 포함되어 있는 부품 수가 많아 예방정비비가 증가하여 수명주기비용이 상대적으로 증가한 것으로 판단된다.

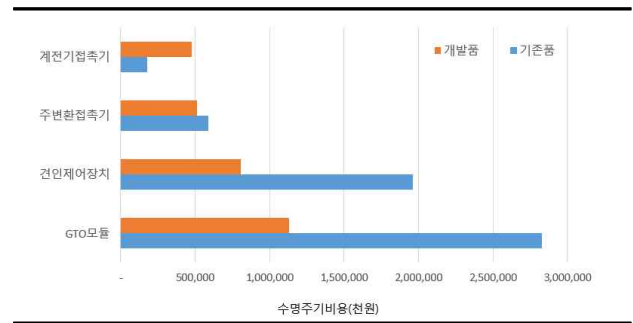


그림 9 주요부품 수명주기비용 비교 분석
Fig. 9 LCC Comparative analysis about Major Parts

4.2 연도별 LCC 분석

그림 10은 기존품 및 개발품에 대한 연도별 LCC 분석 결과를 보여준다. 전체 분석기간은 기관차가 내구연한 30년 간 운행하는 것을 가정하고 분석을 수행하였다. 분석결과 전체적으로 개발품의 수명주기비용이 적은 것을 확인하였으나 도입 비용으로 인한 초기 비용 상승과 부품 교체로 인한 일부 구간에서는 기존품 보다 비용이 높은 것을 확인하였다. 기존품인 경우 부품 교체로 인한 급격한 비용 상승 구간이 있으며 30년 동안 주요부품의 교체 시기가 중복되므로 다른 연도보다 더욱 급격히 증가됨을 알 수 있었다.

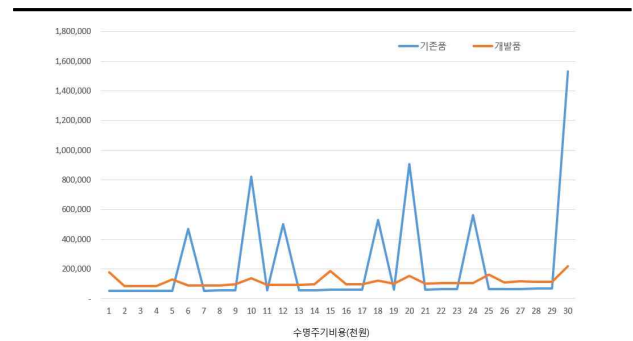


그림 10 연도별 LCC 분석 결과
Fig. 10 LCC comparative analysis for each year

4.3 기존품 및 개발품에 대한 전체적인 LCC

그림 11은 기존품 및 개발품의 수명주기비용에 대한 누적 비용을 나타낸다. 기존품은 재료비의 비중이 크기 때문에 구간별 가파르게 상승하는 시점이 존재함을 알 수 있다. 개발품은 재료비를 비롯하여 예방정비비, 고장정비비 등 비용절감이 많이 이루어져 기존품 대비 완만한 추이를 보인다. 전체 분석기간인 30년 간 전기관차가 운행한다고 가정하면 개발품이 기존품 보다 약 34%의 수명주기비용 절감이 가능함을 추정하였다. 비용 절감의 가장 큰 주요 요인은 부품 구입 비용과 교체주기의 연장을 들 수 있다.

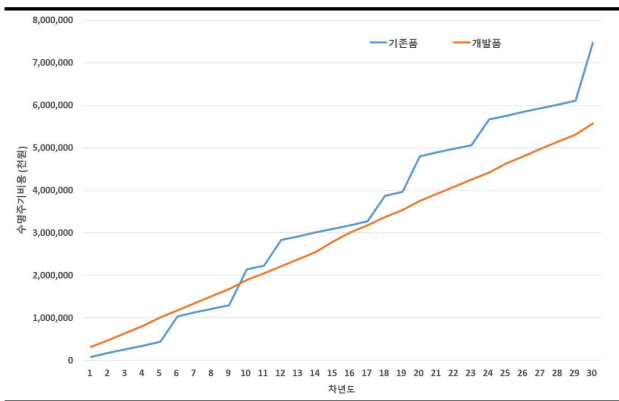


그림 11 기존품 및 개발품 주변환장치 수명주기 누적비용
 Fig. 11 Life Cycle accumulative cost about Conventional and Development main conversion unit

5. 결 론

본 논문에서는 8200호대 전기기관차용 주변환장치에 대해 현재 사용되고 있는 기존품과 주요부품 단종 등에 따른 대체용 개발품에 대해 LCC 비교 분석을 수행하였다. LCC 분석방법은 현재 운용되고 있는 8200호대 전기기관차와 가장 근사하도록 비용평가모델을 개발하였고 정비방법인 8200호대 유지보수매뉴얼, 세척 및 지침 등에 준하여 수행하였다. LCC 분석 항목으로는 주요 부품인 GTO모듈, 견인제어장치, 주변환기 접촉기, 계전기 및 접촉기를 분석하였다.

분석 결과 수명주기비용을 절감하기 위한 방법은 기존품의 경우 고장정비비와 운영비가 최소화되어야 함을 확인할 수 있었다. 이를 위해서는 더 높은 신뢰도와 안전성을 갖는 부품이 필요하다고 판단된다. 개발품의 경우 경정비가 가장 높은 비중을 많이 차지함을 확인하였다. 이는 재료비 절감을 위하여 부품을 간소화하였으며 교체시기가 비슷한 부품들을 모듈화 함으로써 절감될 수 있음을 확인하였다. 따라서 개발품의 수명주기비용을 절감하기 위해서는 기존품 대비 유지보수매뉴얼, 지침 및 체계의 범위를 재정립할 필요가 있으며 이를 통해 회기한도를 늘려 정비횟수를 최소화하고 이에 맞는 유지보수가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 '전기기관차(8200호대) 주변환장치 및 종합제어장치 실용화 기술개발' 과제의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] W.I. Kim, K.S. Lee, J.R. Choi, J.M. Kim, "Life Cycle Cost Analysis of Main Conversion System in 8200 Series

Electric Locomotive", *KJEE*, Vol. 66, No. 12, pp. 1830~ 1835, 2017

[2] J.K. Lee, S.M. Chae, Y.H. Lee, "A Study on Localization Development for 8200 Series Electric Locomotives", *The Korean Society for Railway Conference*, pp. 707-710, 2014
 [3] K.S. Lee, "Life Cycle Cost Analysis of Auxiliary Power Unit for 8200 Series Electric Locomotive Based on Reliability", *Master Thesis*, 2018
 [4] "Maintenance Manual 8200 Series Electric Locomotive (LI-3, 8, GI-3, 6, 9, 10)", KORAIL

저 자 소 개



김 완 일 (Wan-il Kim)

2016년 한경대학교 전기전자제어공학과 졸업.
 2018년 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 석사취득. 2018년~현재 동 대학원 교통정책교통시스템공학과 박사과정 재학



창 윤 우 (Yoon-Woo Chang)

2017년 경기대학교 경영학부 졸업.
 2018년~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 석사과정 재학



김 동 만 (Dong-Man Kim)

1980년 건국대 전기공학과 졸업. 2015년 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 석사취득. 2015년~현재 동 대학원 교통정책교통시스템공학과 박사과정 재학



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 교수
 E-mail : goldmoon@ut.ac.kr