Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 2 pp. 1-7, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.2.1
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

KTX 2차 구동장치에 대한 예방정비 비용의 최적화에 관한 연구

정진태[1], 김철수[2*]
[1]한국교통대학교 교통대학원, [2]한국교통대학교 철도차량시스템공학과

A Study on Cost Optimization of Preventive Maintenance for the Second Driving Devices for Korea Train Express

Jin-Tae Jung[1], Chul-Su Kim[2*]
[1]Graduate School of Transportation, KNUT
[2]Department of Railway Vehicle System, KNUT

요 약 차축 감속기와 차륜으로 구성된 고속철도차량 2차 구동장치는 일체형 조립체이지만, 상이한 기술사양으로 인하여 이들의 예방정비 주기는 서로 다르다. 특히, 이들은 완전분해 정비주기에 따라 매번 동시에 탈부착 작업을 수행한다. 따라서 불필요한 완전분해 정비를 감소하고 높은 열차 가용도를 유지하기 위해서는 신뢰성 중심 유지보수 관점에서 예방정비 비용의 최적화가 중요하다. 본 연구에서는 실제 정비이력으로부터 두 구성품들에 대한 결함나무 분석을 수행하고, 각 하부부품들의 치명도를 고려한 수정된 신뢰도를 각각 평가하였다. 두 구성품에 대한 예방 정비비용의 최적화는 기준 신뢰도 및 개선율을 고려한 유전자 알고리즘으로부터 구하였다. 비용의 최적화는 개체의 적합도 함수에 대한 최대값으로부터 얻는다. 유전자 알고리즘에 의한 최적의 완전분해 정비주기는 285만km로서, 기존 방법의 총비용과 비교하여 약 21% 감소하였다.

Abstract Although the second driving device of KTX, which consists of the wheel and the axle reduction gears unit, is a mechanically integrated structure, its preventive maintenance (PM) requires two separate intervals due to the different technical requirements. In particular, these subsystems perform attaching and detaching work simultaneously according to the maintenance directive. Therefore, to reduce the unnecessary amount of PM and high logistic availability of the train, it is important to optimize PM with regard to reliability-centered maintenance toward a cost-effective solution. In this study, fault tree analysis and reliability of the subsystems, considering the criticality of the components, were performed using the data derived from field data in maintenance. The cost optimization of the PM was derived from a genetic algorithm considering the target reliability and improvement factor. The cost optimization was derived from a maximum of the fitness function of the individual in generation. The optimal TBO of them using the genetic algorithm was 2.85x106 km, which is reduced to approximately 21% compared to the conventional method.

Keywords : axle reduction unit, preventive maintenance, reliability, wheel

1. 서론

철도 운영기관에서는 약 3만개의 부품들로 제작된 철도차량에 대하여 수명주기 동안에 서비스 고장이 없이 경제적인 비용으로 높은 신뢰도를 유지하는 정비계획 수립에 많은 노력을 기울이고 있다.

한국형 고속열차(KTX)의 운행후 도입된 KTX-RCM (Reliability Centered Maintenance) 시스템은 약 12년 동안 편성별・주요 장치별 고장/장애/정비 이력관리 및 신뢰성 분석을 통하여 안정적・효율적인 보수품 수급관

본 논문은 국토교통부 미래철도기술개발사업 (철도핵심부품기술개발 2단계)의 연구과제로 수행되었음.
*Corresponding Author : Chul-Su Kim(Korea National University Transportation)
Tel: +82-70-8855-1649 email: chalskim@ut.ac.kr
Received January 13, 2016 Revised (1st January 27, 2016, 2nd February 3, 2016)
Accepted February 4, 2016 Published February 29, 2016

리체제의 구축에 기여하였다. 본 시스템은 프랑스에서 수입당시 제시된 자료를 바탕으로 각 구성품의 예방정비(preventive maintenance) 주기를 산정하였다. 그러나, 기존 예방정비주기는 국내 환경 및 운행 조건(역간거리, 궤도)의 차이[1,2]로 인하여 경제적인 물품관리와 가용도 향상에 적합하도록 최적 주기를 평가하는 것이 중요하다.

한편, KTX의 2차 구동장치는 [Fig. 1]과 같이 1차 구동장치(견인전동기와 모터감속기)의 출력을 차축감속장치(axle reduction unit, ARU)의 기어비에 의해 적정 회전수로 감속하여 차륜에 토크를 전달하는 일체형 조립체이다. 차륜과 ARU의 예방정비(preventive maintenance)는 [Fig. 2]와 같이 각각 체계정비(systematic works on trainset, SWT)와 제한정비(limited inspection, LI)주기에 따라 'Level I'단계로 수행되며[3,4], 이들의 'Level II'단계인 완전분해 정비주기(Time Between Overhaul, TBO)는 각각 120만km와 180만km로서 상이하다. 특히 차륜의 TBO주기는 [Fig. 3]과 같이 계획대비 변동성이 크므로 기계적으로 일체형 조립체인 두 구성품의 완전분해정비 주기를 맞추어 동시에 수행하기 힘들다. 이들의 예방정비주기 차이는 매번 동시에 탈부착작업과 같은 불필요한 정비작업을 수행해야 되며, 이와 함께 열차 가용도(availability)의 저하에 따른 경제적 손실을 야기한다. 따라서 국내 고속차량의 높은 경제성·신뢰도·안전성·정비도를 유지하기 위해서는 본 구동장치에 대한 최적의 예방정비 주기 평가가 필요하다.

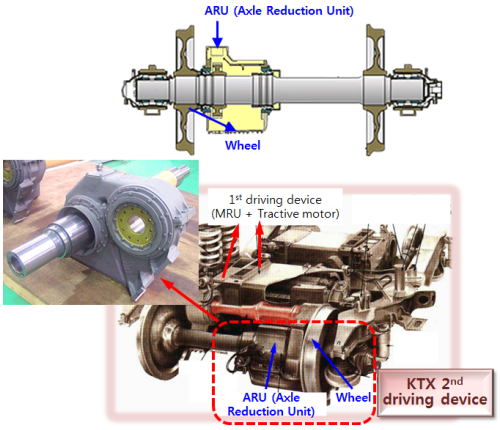


Fig. 1. The ARU and the wheel in the KTX bogie

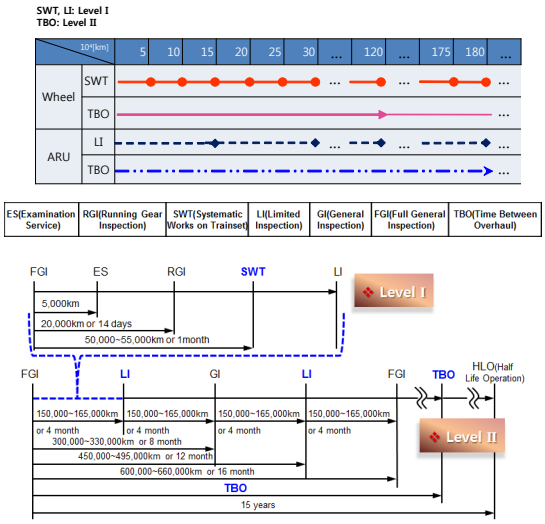


Fig. 2. Criteria for preventive maintenance schedule of KTX subsystems

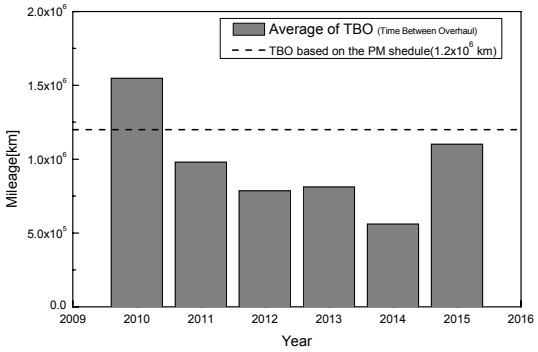


Fig. 3. Time between overhaul history of the wheel

RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety) 관점에서 시스템과 부품의 예방유지보수 체계[5-6] 및 예방정비 최적화[7-9]에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 김종운 등[5]은 철도시스템의 RAMS고유성능을 지속가능하도록 유지보수 정책을 위한 개념적 절차를 제시하였다. 김재훈 등[6]은 규격과 가이드로부터 예방 및 유지보수정보 데이터베이스를 제안하고 전동차 보조전원장치를 대상으로 각 정비비용을 검토하였다. 또한 정충민 등[7]은 유전자 알고리즘을 이용한 전동차 도어엔진부품의 최적 유지보수주기를 산정하였다. 그러나 이들 연구는 유지보수에 RAMS를 도입하기 위한 개념설계단계 연구에 머물거나, 하부부품의 신뢰성과 경제성을 동시에 고려한 일체형 구성품들에 대한 최적 예방정비주기 연구는 미비하다.

따라서 본 연구에서는 고속철도차량 일체형 2차 구동장치의 각 하부부품에 대한 정비이력으로부터 치명도와 신뢰도를 평가하고, 불필요한 예방정비주기를 최소화 할 수 있는 최적 TBO주기를 평가하고자 한다.

2. 결함나무 분석과 신뢰도 평가

2차 구동장치의 신뢰도를 체계적으로 평가하기위해서는 이의 하부부품에 대한 결함나무분석을 통하여 각각의 유형별 원인분석 및 치명도(심각도, 발생빈도 및 검출도의 기하평균)를 평가하는 것이 필요하다.

[Fig. 4]는 2차 구동장치의 결함나무 분석(fault tree analysis)결과를 나타낸 것이다. 그림에서 각 하부부품에 대한 결함/고장 발생의 사상(event)과 인과관계는 논리기호(AND 또는 OR)를 사용하여 나뭇가지 형태로 구성하였다. 이로부터 RAMS관점에서 예방정비비용을 산출하기 위하여 본 연구에서는 하부 부품들의 치명도 평점(risk priority number, RPN)[10]과 보전후에 신뢰도 개선율 (improvement factor,y_i)[9]을 함께 고려하였다.

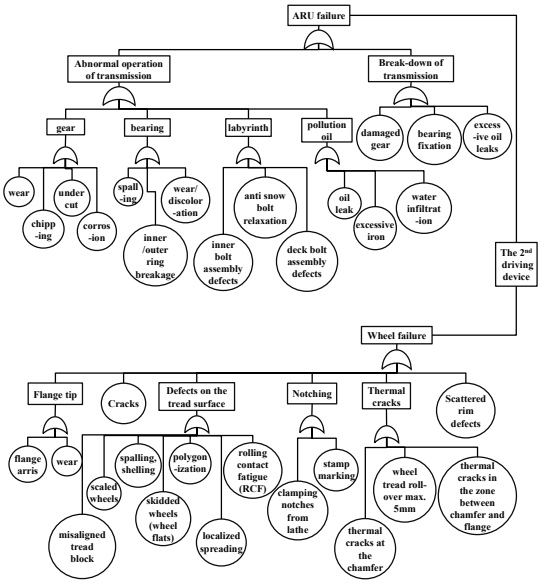


Fig. 4. Fault tree analysis results of the 2nd drving device

여기서 신뢰도 개선율은 정해진 주기에 따라 구성품을 신품상태는 아니지만, 일정 시점의 이전상태로 신뢰도를 개선한다는 의미이다[9].

본 연구의 예방정비는 신뢰도 개선율에 따라 일반정비와 완전분해정비로 구분한다. 일반 예방정비시에 신뢰도 개선율은 식 (1)과 같이 정비이력에 준하여 변화하지만, 완전분해정비의 경우는 제품의 원상태로서 신뢰도 '1'로 개선된다고 가정한다.

$$D_i = D_{i-1} + (k_i - k_{i-1}) \cdot (1 - y_i),\ k_i^s = k_i - D_i \quad (1)$$

여기서, D_i는 i번째 예방정비까지 개선되지 못한 총 신뢰도이며, k_i는 i번째 예방정비 시점(주행거리), y_i는 i번째 예방정비 후 개선율을 의미한다. 그리고 k_i^s는 다음 시점 k_{i+1}에서 적용될 새로운 시작 시점을 의미한다.

본 구성품에 대한 하부부품의 고장영향에 대한 치명도 평점인 RPN은 식(2)이며[10], 각 구성품의 수정된 고장율(λ)과 신뢰도($R(k)$)는 각각 식 (3) 및 (4)와 같다[9].

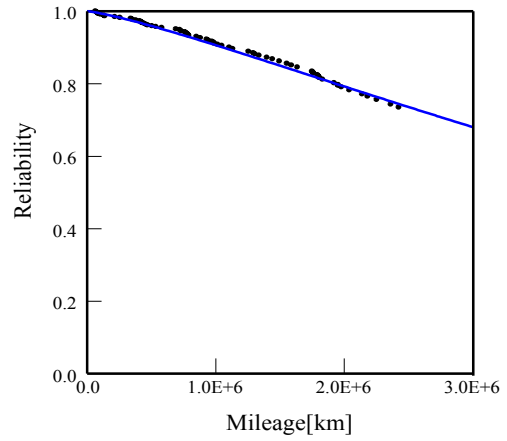
$$RPN = (\text{심각도} \times \text{발생빈도} \times \text{검출도})^{1/3} \quad (2)$$

$$\lambda_A = \sum_{c=1} (\lambda_c \cdot RPN_c),\ \lambda_w = \sum_{c=1} (\lambda_c \cdot RPN_c) \quad (3)$$

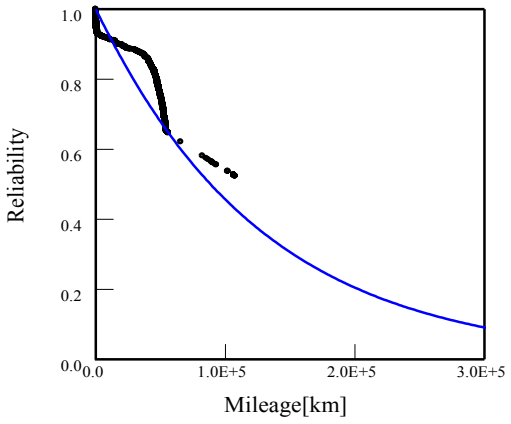
$$R_A(k) = e^{-(\lambda_A \cdot (k_i - k_i^s))^\beta},\ R_w(k) = e^{-(\lambda_w \cdot (k_i - k_i^s))^\beta} \quad (4)$$

여기서 첨자 A와 w는 각각 차축감속기와 차륜을 의미하고, 첨자 c는 각 하부 부품을 순서대로 숫자를 부여한 것으로 λ_c는 c번째 부품의 고장율이다. 또한 각 구성품의 고장발생에 대한 확률론적 특성은 2모수 와이블분포(2-parameters Weibull distribution)에 따른다고 가정하며, 식 (4)의 β는 형상모수(shape parameter)이다.

[Fig. 5]는 주행키로에 따른 차축감속기와 차륜에 대한 식 (4)의 신뢰도를 각각 나타낸 것이다. 이는 2004년 개통이후부터 2013년까지 이들의 고장 및 정비이력(총 데이터수: 3,439)으로부터 얻어진 것이다[4]. 또한 이 그림은 각 부품들의 교환일자/원인/주행거리/위치별로 구분하여 입력자료를 정리하고, Weibull ++7[11]를 이용하여 구한 것이다. 이로부터 차축감속기와 차륜에 대한 식 (4)의 와이블분포의 형상모수 값은 각각 1.2414 및 1.016이다[4]. 이는 최소의 총 예방정비 비용을 위한 최적 정비주기의 산정에 적용된다.



(a) ARU



(b) wheel

Fig. 5. Modified reliability curves of the ARU and the wheel

3. 예방정비 비용의 최적화

3.1 예방정비 비용

Fig. 6은 식 (1)~(3)로 부터 최적의 예방정비 비용 평가를 위한 흐름도를 나타낸 것이다. 본 구성품은 열차 서비스고장이 발생하지 않도록 기준신뢰도에 대한 허용범위에 따라 예방정비를 수행한다. 이러한 관점에서 총 정비비용($\sum_{i=1} C_i^t$)중에서 예방정비비용은 각 구성품의 신뢰도($R(k)$)와 기준신뢰도(RM_t)의 비교함으로서 각각 계산한다. 그림에서 C_p는 일반예방정비 비용이며, C_o는 완전분해정비 비용, C_s는 서비스고장 비용이다. $RM_t - R(k)/P$ 는 예방정비 시점에서 구성품의 신뢰도와 기준신뢰도가 차이에 비례하여 서비스고장 비용의 발생 정도를 의미하며, P는 신뢰도 허용범위이다. 이는 철도운영에 핵심인 서비스 고장비용을 요구된 신뢰도의 만족도(허용여부)에 따라 계산한다.

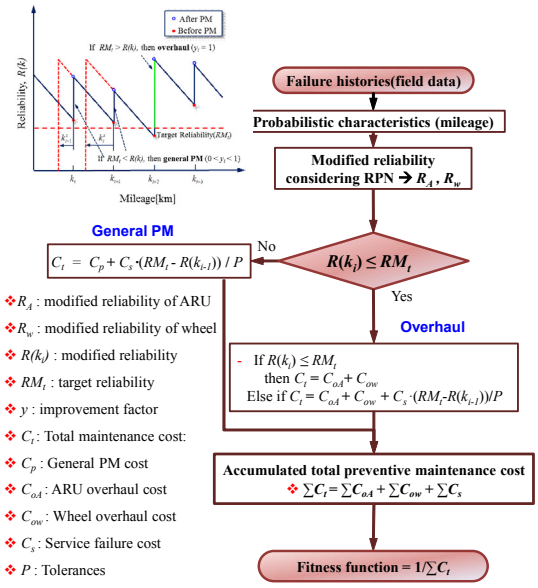


Fig. 6. The evaluation procedure of the total preventive maintenance cost

3.2 유전자알고리즘을 이용한 예방정비 비용의 최적화

[Table 1]은 단계별 각 구성품의 예방정비비용을 정리한 것이다[4]. 표에서 첨자 SWT와 LI의 일반 예방정비(general PM)는 일상적이고 반복적인 상태검사 및 불량사항 처리작업을 수행하는 'Level I'의 경정비이지만, TBO는 편성차량 전체를 완전 분해정비인 'Level II'의 중정비를 의미한다. 이로부터 중정비인 TBO는 탈부착 작업과 수입부품 교체로 인하여 일반 예방정비보다 이의 비용이 약 100배 많고, 열차 가용도의 저하로 영업손실을 야기한다. 따라서 기계적 일체형인 두 구성품의 총 예방정비비용을 최소화하기위해서는 동일한 최적의 TBO 주기를 산정함으로써 불필요한 중정비 비용과 가용도 저하를 방지하는 것이 필요하다.

[Fig. 7]은 총 예방정비비용을 최소화하는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)[12]의 흐름도를 나타낸 것이다. 본 구성품의 최적 TBO 주기산정은 이전연구[8,9]로부터 비교적 빠른 시간동안 최적 근사해에 효율적인 유

전자 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘에서 각 개체를 구성하는 유전자는 임의의 최소 예방정기주기이며, 각 세대별 유전자형은 '0~4'의 정수로 표현한다. 각 개체의 적합도함수(Fitness function)는 식 (5)로부터 총 정비비용의 역수로 공식화하여 얻는다.

Table 1. Parameters to evaluate the optimal PM

Division	Value
Total life	12,000,000[km], 20years
individual	240[per 50,000km]
target reliability	$RM_{aru} = 0.97$, $RM_w = 0.97$
improvement rate	$0.5 < y_A < 1$, $0.5 < y_w < 1$
General preventive maintenance(PM) cost Cp	$C_{p_{sut}} = 17,526,890$[won] $C_{p_{LI}} = 27,526,890$[won] $C_{p_{GI}} = 37,680,194$[won] $C_{p_{FGI}} = 52,296,945$[won]
time between overhaul (TBO) cost	$C_{o_A} = 4,294,892,304$[won] $C_{o_w} = 1,689,120,000$[won]
service failure cost	$C_s = 100,000,000$[won]
tolerances	$P = 0.001$

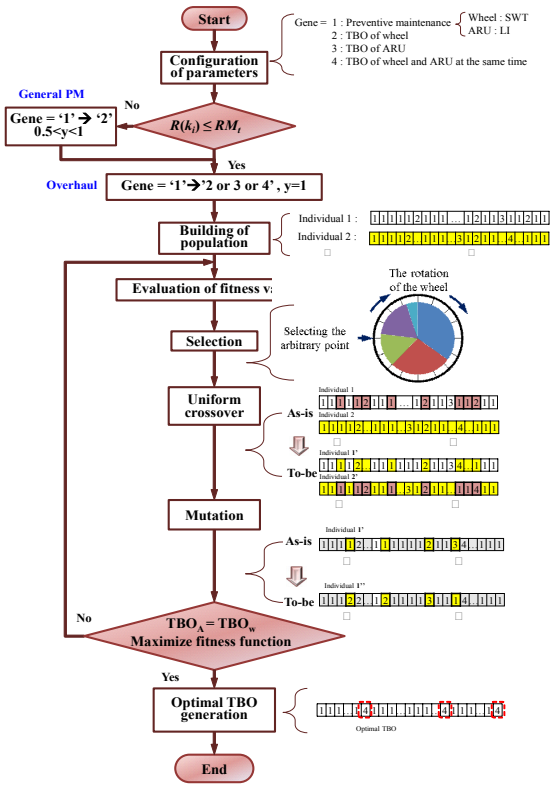


Fig. 7. The Genetic algorithm of the optimal preventive procedure

$$\text{적합도:} \quad 1/\sum_{i=1}^{n} C_i^t \tag{5}$$

여기서 유전자 알고리즘 시뮬레이션의 구동된 개체수(individuals)와 세대수(population)은 각각 50 및 500이며, 반복횟수(Iteration)는 300회 이상이며, 완전분해정비의 기준신뢰도(RM_t)는 0.97이다.

[Fig. 8]은 유전자알고리즘으로 구현한 예방정비주기에 따른 2개 장치의 신뢰도 변화를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 두 장치의 TBO가 처음으로 일치하는 시점은 285만km로서, 본 연구에서는 최적의 TBO주기이다. 이로부터 주행거리에 따른 누적된 총 정비비용은 [Fig. 9]와 같다. 그림에서 차량 내구수명(1천2백만km)까지 유전자 알고리즘의 최적 TBO주기에 의한 총 예방정비 비용(약 453억원)은 기존(약 584억원)보다 약 21%까지 감소한다. 이의 원인은 완전분해정비동안 두 구성품에 대한 중복된 탈부착 비용 제거와 낮은 고장율의 차축감속기 TBO 주기가 증가하기 때문이다.

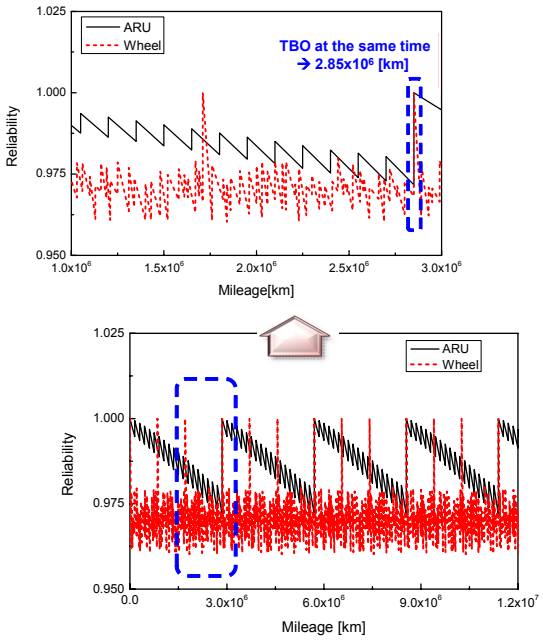


Fig. 8. the reliability change of each system on the PM schedule

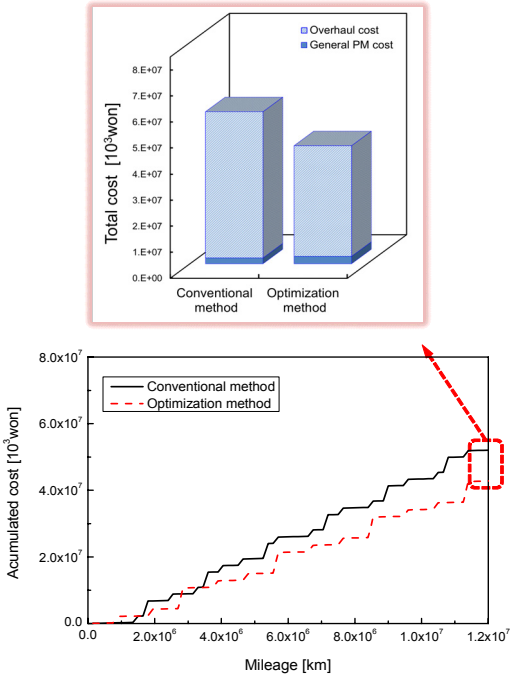


Fig. 9. Comparison of total preventive maintenance costs

4. 결론

본 연구에서는 KTX 일체형 2차 구동장치인 차륜과 차축감속기의 정비이력으로부터 신뢰도, 치명도 및 경제성을 고려하여 최적 TBO주기를 산출하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 유형별 고장원인 분석 및 치명도 평가를 위하여 하부부품들에 대한 결함/고장 발생의 사상과 인과관계로부터 논리기호에 따른 나뭇가지 형태의 결함나무 분석을 수행하였다.

(2) 차륜과 차축감속기의 형상모수는 각각 1.2414 및 1.016로서, 두 구성품의 고장율 유형은 시간 의존적 열화모형인 고장율 증가형이므로 전형적인 예방정비형 구성품이다.

(3) 본 구성품에 대하여 부품별 결함나무분석과 이의 치명도를 할당하여 수정된 신뢰도를 평가하였다. 이로부터 최소 정비비용을 갖는 최적의 완전분해정비주기는 유전자알고리즘을 이용하여 285만km로 산출되었다. 이로부터 차량 내구수명까지 최적 주기에 의한 총 예방정비비용(약 453억원)은 기존(약 584억원)보다 약 21%까지 감소한다. 이 기법은 향후 다른 철도차량에서 상이한 TBO를 갖는 일체형 구성품들에서도 최적 교체주기 산정에 적용할 수 있다고 사료된다.

References

[1] S. H. Ahn, K. W. Chung, S. H. Jang and C. S. Kim, “Durability Evaluation of the Korean Gauge-Adjustable Wheelset System”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.13, No.12, pp.5669-5675, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5669

[2] C. S. Kim and G. H. Kang, “Fatigue Analysis of Reduction Gears Unit in Rolling Stock Considering Operating Characteristics”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.12, No.3, pp.1085-1090, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1085

[3] G. H. Kang, “Maintenance of High Speed Rail Vehicles: Theory and Practice”, Samsung Publishing, 2009.

[4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government, “Railroad Core Component/Device Technology Deveolpment Phase 2”, Report-15RTRPB084184, 2014.

[5] J. W. Kim, J. S. Park, H. Y. Lee and J. H. Kim, “A Conceptual Procedure of RAMS Centered Maintenance for Railway Systems” J. of the Korean Society for Railway, Vol.11, No.1, pp.19-25, 2008.

[6] J. H. Kim, H. K Jeon, J. S Park and H. Y. Jeong, “A Study on the Life Cycle Cost Calculation of the Railroad Vehicle Based on the Maintenance Information”, J. of the Korean Society for Railway, Vol.12, No.1, pp.88-94, 2009.

[7] C. M. Jeong, K. J. Park, J. G. Lee, D. J. Shin and A. Y. Song, “A Study on Optimization of Preventive Maintenance for Urban Transit Vehicle using Genetic Algorithm”, KSAE spring Conference, pp.2407-2410, 2011.

[8] M. Marseguerra and E. Zio, “Optimizing Maintenance and Repair Policies via a Combination of Genetic Algorithms and Monte Carlo Simulation”, Reliability Engineering and System Safety No.68, pp.69-83, 2000.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00007-7

[9] Y. T. Tsai, K.S. Wang and H.Y. Teng, “Optimizing Preventive Maintenance for Mechanical Components Using Genetic Algorithms”, Reliability Engineering and System Safety, No.74, pp.89-97, 2001.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00065-5

[10] Military standard, “Procedures for Preforming a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis”, MIL-STD-1629A, 1980.

[11] ReliaSoft, “Weibull ++7”, ReliaSoft User’s Guide, 2005.

[12] E. G. Shopova and N.G. Vaklieva-Bancheva, “BASIC-A Genetic Algorithm for Engineering Problems Solution”, Computers and Chemical Engineering, Vol. 30, No. 8, pp. 1293-1309, 2006.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.03.003

정 진 태(Jin-Tae Jung) **[정회원]**

- 1983년 7월 ~ 현재 : 철도청 기계사문관, 한국철도공사 기술 1급
- 2001년 8월 : 한남대 경영대학원(산업경영학 석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원(박사과정)

<관심분야>
철도차량설계, 철도차량RAMS

김 철 수(Chul-su Kim) **[종신회원]**

- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 교수(교통대학원 겸직)

<관심분야>
철도차량설계, 철도차량RAMS