

# 고속철도차량 1차 구동장치에 대한 완전분해정비의 최적 주기 평가

정진태<sup>1</sup>, 김철수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국철도공사 충북본부, <sup>2</sup>한국교통대학교 철도차량시스템공학과

## Evaluation of Optimal Time Between Overhaul Period of the First Driving Devices for High-Speed Railway Vehicle

Jin-Tae Jung<sup>1</sup>, Chul-Su Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Chung-Buk HQ, KORAIL

<sup>2</sup>Department of Railway Vehicle System, KNUT

**요약** 고속철도차량 동력대차의 1차 구동장치는 모터 감속기와 견인전동기로 구성한다. 모터 감속기와 견인전동기는 기계적으로 일체형 결합 구조이지만, 상이한 기술 요구사항으로 인하여 이들의 완전 분해정비 주기는 서로 다르다(모터 감속기의 완전 분해정비 주기:  $1.8 \times 10^6$  km, 견인전동기의 완전 분해정비 주기:  $2.5 \times 10^6$  km). 따라서 불필요한 정비 횟수를 감소하기 위하여 신뢰성 중심 유지보수 관점에서 최적의 완전 분해정비 주기의 산정이 중요하다. 본 연구에서는 실제 유지보수 정비가력으로부터 두 구성품들에 대한 고장 결합나무 분석을 수행하고 각 하부부품들의 치명도를 고려한 고장률을 각각 평가하였다. 두 구성품에 대한 최적의 동일한 완전분해 정비주기는 기존의 총 예방정비 비용을 감소하기 위하여 유전자 알고리즘으로부터 얻었다. 이 알고리즘에서 각 개체를 구성하는 유전자는 최소 예방 정비주기이며, 이의 조합으로 구성된 세대별 개체의 적합도함수는 총 정비비용의 역수로 공식화하여 얻는다. 최소공배수에 의한 방법은 기존 대비 4%만 감소하지만, 유전자 알고리즘에 의한 최적의 동일 완전분해 정비주기는 225만km로서 기존 방법의 총비용과 비교하여 약 14% 감소하였다.

**Abstract** The first driving device of the power bogies for the Korean high-speed railway vehicle consists of the traction motor (TM) and the motor reduction gears unit (MRU). Although TM and MRU are the mechanically integrated structures, their time between overhauls (TBO) have two separate intervals due to different technical requirements(i.e. TBO of MRU:  $1.8 \times 10^6$ km, TBO of TM:  $2.5 \times 10^6$ km). Therefore, to reduce the unnecessary number of preventive maintenances, it is important to evaluate the optimal TBO with a viewpoint of reliability-center maintenance towards cost-effective solution. In this study, derived from the field data in maintenance, fault tree analysis and failure rate of the subsystem considering criticality of the components are evaluated respectively. To minimize the conventional total maintenance cost, the same optimal TBO of the components is derived from genetic algorithm considering target reliability and improvement factor. In this algorithm, a chromosome which comprised of each individual is the minimum preventive maintenance interval. The fitness function of the individual in generation is acquired through the formulation using an inverse number of the total maintenance cost. Whereas the lowest common multiple method produces only a four percent reduction compared to what the existing method did, the optimal TBO of them using genetic algorithm is  $2.25 \times 10^6$ km, which is reduced to about 14% comparing the conventional method.

**Keywords** : fault tree analysis, failure rate, time between overhaul, traction motor, motor reduction gears unit

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 October 23, 2015

Revised November 30, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

### 1. 서론

국내 고속철도차량 구성품은 환경(기후, 일조량, 고도)[1] 및 운행 조건(역간거리, 궤도)의 차이[2]로 인하여 프랑스에서 수입당시 산정된 이의 교체주기를 수정해야 한다. 이들 부품은 다분야와 달리 소량 다품종이므로 물류지연으로 인한 가용도 저하를 방지해야 한다. 즉, 열차 운행동안 높은 물류가용도(logistic availability)를 유지하기 위해서는 각 구성품에 대한 경제성·신뢰도·안전성·정비도를 함께 고려한 최적의 예방정비(preventive maintenance) 주기산정이 요구된다. 따라서 이들 부품들에 대한 신뢰도 중심 유지보수(Reliability Centered Maintenance, RCM)기법을 이용한 안정적·효율적인 보수품 수급관리체제의 구축이 중요하다.

한편, 국내 고속철도차량의 1차 구동장치에 주요 구성품인 견인전동기(traction motor, TM)와 모터 감속기(motor reduction gear unit, MRU)는 [Fig. 1]과 같이 TM의 회전력을 MRU의 기어비에 의해 적정 회전수로 감속하는 일체형 조립체이다. 이들은 완전분해정비주기(Time Between Overhaul, TBO)에 따라 매번 동시에 탈부착 작업을 수행한다. 즉, 견인전동기(TBO: 250만km)와 모터 감속기(TBO: 180만km)는 [Fig. 2]와 같이 TBO의 상이함으로 인하여 불필요한 정비작업 및 가용도 저하를 초래한다. 따라서 국내 고속차량의 높은 경제성·신뢰도·안전성·정비도를 함께 유지하기 위해서는 견인전동기와 모터감속기에 대한 최적의 TBO 평가가 필요하다.

철도차량 예방유지보수 및 신뢰성에 관한 연구[3-5]를 살펴보면, 이덕규 등[3]은 도시철도차량의 운행고장 데이터 분석을 통한 도어시스템의 완전분해 정비주기를 결정하는 사례를 제시하였다. 정인수 등[4]은 철도차량의 신뢰성/가용성/유지보수성(RAM)목표값 설정 방법과 요구조건을 제안하였고, 유양하 등[5]은 관리우선순위를 고려한 고속철도차량의 신뢰성유지보수 체계 및 절차에 대한 기본 방향을 제시하였다. 그러나 이들 연구는 철도차량 유지보수에 RAM을 도입하기 위한 개념단계 연구에 머물러 있으며, 구성품의 하부부품들에 대한 각각의 치명도, 신뢰도 및 비용을 함께 고려하여 최적의 완전분해정비 주기를 산정한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고속철도차량 일체형 1차 구동장치의 각 부품에 대한 정비이력으로부터 치명도와 신뢰도를 평가하고, 불필요한 완전분해정비주기를 제거한 최소 정비비용을 갖는 최적 TBO주기를 평가하고자 한다.

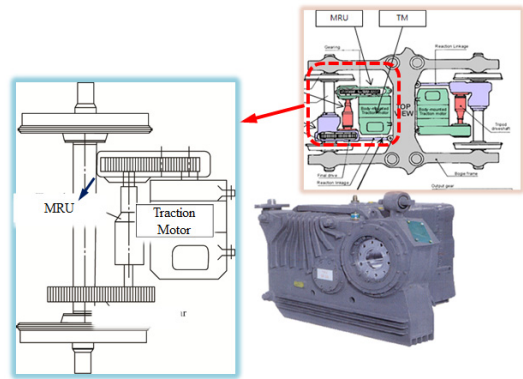


Fig. 1. Driving device of the KTX

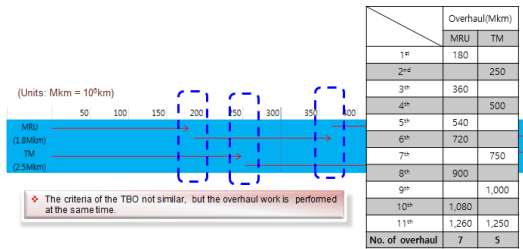


Fig. 2. A comparison between TBOs of MRU and TM

## 2. 완전분해 정비주기와 비용 평가

### 2.1 구동장치의 완전분해 정비주기

Fig. 3은 고속철도차량 모터감속기(MRU)와 견인전동기(TM)의 예방정비주기를 정리한 것이다. 이 그림에서 기본검수(ES)부터 체계검수(SWT)까지는 ‘Level I’로서, 편성단위로 일상적인 안전 및 상태검사에 국한한 일반예방정비(general preventive maintenance)이다. 그러나 제한검수(LI)부터 반수명대수선(HLO)까지는 부품을 수리/교체함으로써 이의 신뢰도를 개선한다(Level II). 후자중에서 TBO는 Fig. 4와 같이 마모(또는 열화)고장을 방지하고자 수리 가능한 부품을 대상으로 신뢰도를 완제품처럼 회복하도록 보전하는 완전분해정비주기이다[6]. 따라서 일체형인 본 장치들의 운행안전 및 유지보수 절감을 동시에 만족하기 위해서는 단순한 조건적 예방정비주기가 아니라 신뢰도 중심의 체계적 정비(systematic maintenance)주기로서, 이들의 공통된 TBO 최적주기 평가가 필요하다.

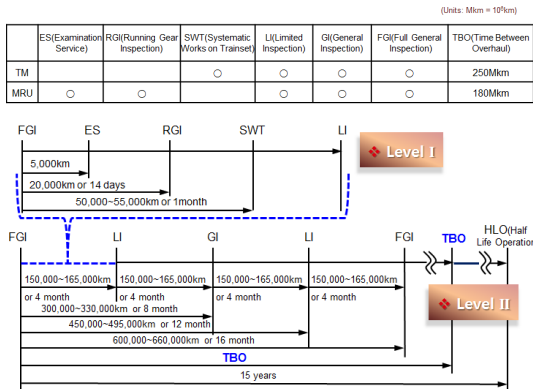


Fig. 3. Criteria for preventive maintenance schedule of KTX subsystems

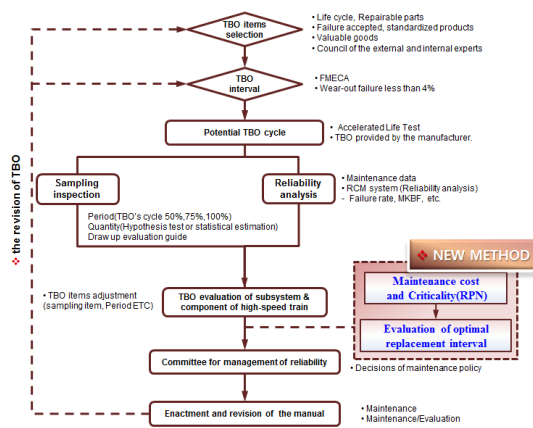


Fig. 4. TBO management framework of Korail

### 2.2 신뢰도개선과 치명도를 고려한 정비 비용

구동장치에 대한 최적의 TBO를 얻기 위하여 각 구성품의 자체 신뢰도와 고장률(failure rate) 뿐만아니라, 본 연구에서는 하부 부품들의 치명도(risk priority number, RPN) 및 보전후에 신뢰도 개선율(improvement factor,  $y_i$ )을 함께 고려한 총 정비 비용을 산출하고자 한다.

예방정비간 고장 발생은 비균질 프아송과정(Non-Homogeneous Poisson Process)[7]을 적용하고, 다음의 세 가지 조건을 가정하였다.

먼저, 레벨 I(level I)의 기본검수(ES)부터 체계검수(SWT)까지는 신뢰도에 영향을 끼치지 않는 최소수리를 수행한다고 가정한다. 여기서 최소수리 전과 후에 구성품의 노화 과정에 신뢰도 변화는 없다.[7] 두 번째, 완전 분해정비(TBO)는 Fig 5와 같이 제품의 원상태로서 신뢰도 ‘1’로 개선된다고 가정한다. 마지막으로 Fig. 5에서

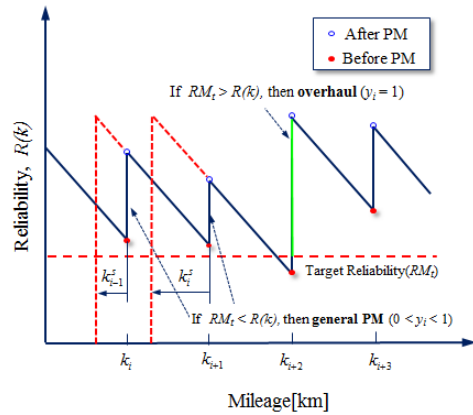


Fig. 5. Improved reliability of the subsystem with maintenance types; Overhaul (TBO or HLO)

제한검수(LI) 등과 같은 일반예방정비는 노화 과정동안 신뢰도를 개선한다. 신뢰도 개선을 의미하는 개선율은 정해진 주기에 따라 구성품을 신제품상태는 아니지만, 일정 시점의 이전상태로 신뢰도를 개선한다는 의미이다. 즉, 일반 예방정비시에 신뢰도 개선율은 식 (1)과 같이 정비이력에 준하여 변화하지만, 완전분해정비의 경우는 일정하다.

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

$$k_i^s = k_i - D_i \tag{1}$$

여기서,  $D_i$ 는  $i$ 번째 예방정비까지 개선되지 못한 총 신뢰도이며,  $k_i$ 는  $i$ 번째 예방정비 시점(주행거리),  $y_i$ 는  $i$ 번째 예방정비 후 개선율을 의미한다.

$k_i^s$ 는 다음 시점  $k_{i+1}$ 에서 적용될 새로운 시작 시점을 의미한다.

한편, 고장모드 치명도분석(failure mode effects and criticality analysis) 결과[8]로부터 각 구성품에 대한 하부부품의 고장영향에 대한 기여도를 고려하기 위하여 치명도 평점(Risk Priority Number, RPN)[9]을 도입하였다. 이로부터 각 구성품의 신뢰도는 식 (2)와 같다.

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

식(2)로부터 견인전동기와 모터감속기의 각 구성품의 수정된 고장률( $\lambda$ )과 신뢰도( $R(k)$ )는 각각 식 (3)과 (4)와 같다.

$$\lambda_{tm} = \sum_{c=1} (\lambda_c \cdot RPN_c), \lambda_{mru} = \sum_{c=1} (\lambda_c \cdot RPN_c) \quad (3)$$

$$R_{tm}(k) = e^{-(\lambda_{tm} \cdot (k_i - k_i^s))^\beta}$$

$$R_{mru}(k) = e^{-(\lambda_{mru} \cdot (k_i - k_i^s))^\beta} \quad (4)$$

여기서 첨자 **tm**과 **mru**는 각각 견인전동기와 모터감속기를 의미하고, 첨자 **c**는 각 하부 부품을 순서대로 숫자를 부여한 것이고,  $\lambda_c$ 와  $RPN_c$ 는 **c**번째 부품의 고장률과 치명도 평점이다.

본 구성품은 열차 서비스고장을 발생하지 않도록 기준신뢰도에 대한 허용범위에 따라 예방정비를 수행한다. 이러한 관점에서 총 정비비용( $\sum_{i=1} C_i^t$ )중에서 예방정비 비용은 각 구성품의 신뢰도( $R(k)$ )와 기준신뢰도( $RM_t$ )의 비교함으로써 식 (5)와 같이 각각 계산한다.

일반정비( $RM_t \leq R(k_i)$ ):  $0.5 < y < 1$ ,

$$\sum_{i=1} C_i^t = \sum_{i=1} C_{p_i} + \sum_{i=1} C_r \cdot E[N(k)]_{i-1} + \frac{RM_t - R(k_{i-1})}{P} \cdot C_s \quad (5a)$$

완전분해정비( $RM_t > R(k_i)$ ):  $y=1$ ,

$$\sum_{i=1} C_i^t = \sum_{i=1} C_{o_i} + \sum_{i=1} C_r \cdot E[N(k)]_{i-1} + \frac{RM_t - R(k_{i-1})}{P} \cdot C_s \quad (5b)$$

여기서  $C_p$ 는 일반예방정비 비용이며,  $C_o$ 는 완전분해정비 비용,  $C_r$ 는 고장수리 비용,  $E[N(k)]_i$ 는 하부부품의 평균 고장발생횟수,  $C_s$ 는 서비스고장 비용이다.

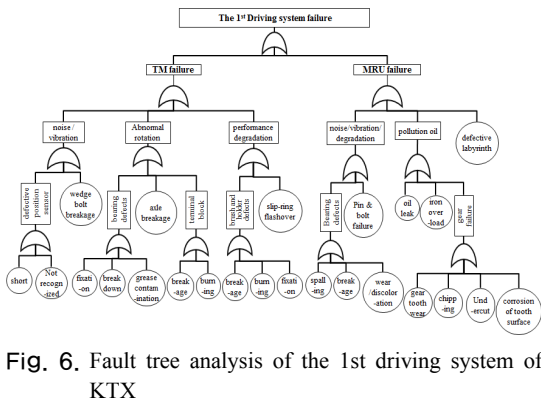


Fig. 6. Fault tree analysis of the 1st driving system of KTX

$RM_t - R(k) / P$ 는 예방정비 시점에서 구성품의 신뢰도와 기준신뢰도가 차이에 비례하여 서비스고장 비용의 발생 정도를 의미하며,  $P$ 는 신뢰도 허용범위이다. 이는 철도운영에 핵심인 서비스 고장비용을 요구된 신뢰도의 만족도(허용여부)에 따라 계산한다.

### 3. 최적의 완전분해정비주기 평가

#### 3.1 고장율

Fig. 7은 주행키로에 따른 견인전동기와 모터감속기의 고장율 선도를 각각 나타낸 것이다. 이는 2004년 개통이후부터 2013년까지 총 552개의 구동장치중에서 견인전동기와 모터감속기의 고장 및 정비이력(총 데이터 수: 2,472)으로 얻어진 것이다.[8] 또한 이 그림은 각 부품들의 교환일자/원인/주행거리/위치별로 구분하여 입력 자료를 정리하고, Weibull ++7[10]를 이용하여 각각의 신뢰도와 확률밀도함수로부터 구한 것이다. 그림에서 두 구성품의 고장율 유형은 시간 의존적 열화모형인 고장율 증가형이다. 참고로 견인전동기와 모터감속기의 형상모수는 각각 1.0570 및 1.2247이다[8].

#### 3.2 유전자알고리즘을 이용한 최적의 완전분해정비 주기

Fig. 8은 총 정비비용을 최소화하는 최적의 완전분해정비주기를 산정하는 알고리즘 흐름도를 나타낸 것이다. 그림 상단에서 보는 바와 같이 총 정비비용은 식 (5)로부터 얻어지며, 각각의 설정값은 Table 1과 같다.[8] 완전분해 정비주기는 전역 최적 근사해에 효율적인 유전자

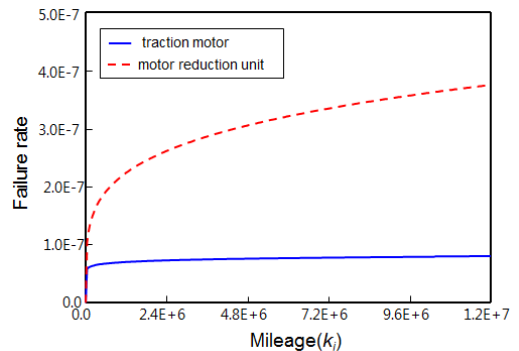


Fig. 7. Failure rate curves of MRU and TM

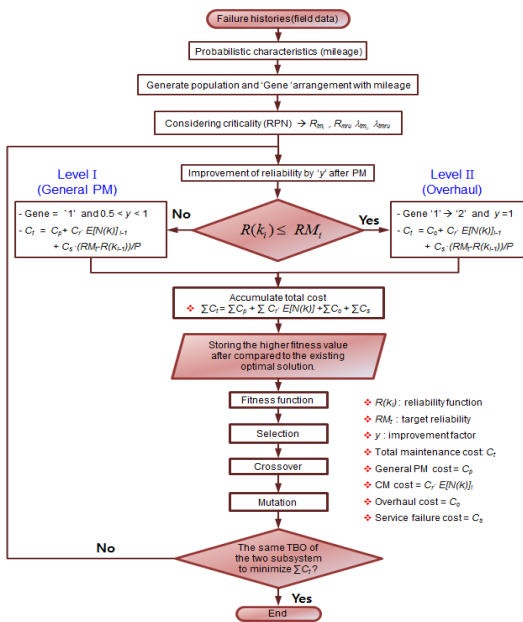


Fig. 8. The flow diagram of the optimal TBO evaluation procedure by using Genetic algorithm

알고리즘(Genetic algorithm)[11]을 이용하였다. 이 알고리즘에서 임의의 최소 예방정비주기는 하나의 개체이며, 각 세대 별 유전자형은 '0, 1, 2'의 정수로 표현한다. 각 개체의 적합도함수(Fitness function)는 식 (6)으로 부터 총 정비비용의 역수로 공식화하여 얻는다.

$$\text{적합도: } 1 / \sum_{i=1}^n C_i^t \quad (6)$$

여기서 유전자 알고리즘 구동에 필요한 개체수 (Individuals)는 500이상이며, 완전분해정비의 기준신뢰도(RM)는 0.95이고, 반복횟수(Iteration)는 300회이다. Fig. 9는 유전자알고리즘으로 구현한 예방정비주기에 따른 2개 장치의 신뢰도 변화를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 두 장치의 TBO가 처음으로 일치하는 시점은 225 만km로서, 본 연구에서는 최적의 TBO주기이다. Table 2는 기존방법, 최소공배수 및 본 연구의 최적화방법에 따라 산정된 TBO횟수를 함께 비교한 것이다. 이로부터 주행거리에 따른 누적된 총 정비비용은 Fig. 10과 같다. 그림에서 최소공배수에 의한 방법은 기존 대비 4%감소 하지만, 유전자알고리즘의 최적 TBO주기는 약 14%까지 감소한다. 따라서 최소비용은 이들 중에서 신뢰도 및 치명도를 고려하여 유전자알고리즘의 최적 TBO주기에 의하여 산출된다.

Table 1. Parameters to evaluate the optimal TBO

Parameters	Value
Total life	12,000,000[km]
Individual	80[per 150,000km]
Target reliability	$RM_{mru} = 0.95, RM_{bm} = 0.95$
Improvement factor	$0.5 < y_{mru} < 1, 0.5 < y_{bm} < 1$
Preventive maintenance cost	$C_{P,LI} = 27,526,890$ [won]
	$C_{P,Gr} = 37,680,194$ [won]
	$C_{P,LI} = 52,296,945$ [won]
Time between overhaul cost	$C_{O,mru} = 7,759,224,984$ [won]
	$C_{O,bm} = 4,012,331,784$ [won]
Service failure cost	$C_s = 100,000,000$ [won]
Tolerances	$P = 0.001$

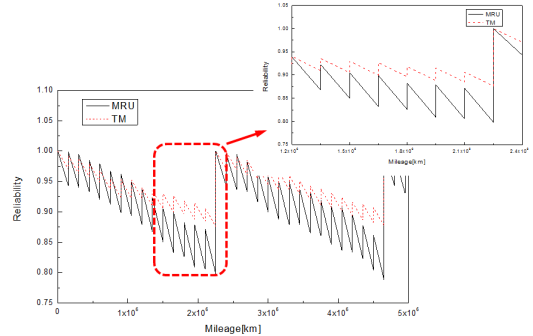


Fig. 9. the reliability change of each system on the PM schedule

Table 2. Comparison of Mileages of MRU and TM at each TBO for each model

	conventional method		least common multiple method		optimization method	
	MRU [10 <sup>4</sup> km]	TM [10 <sup>4</sup> km]	MRU [10 <sup>4</sup> km]	TM [10 <sup>4</sup> km]	MRU [10 <sup>4</sup> km]	TM [10 <sup>4</sup> km]
1 <sup>st</sup>	180		180		225*	225*
2 <sup>nd</sup>		250		270	450*	450*
3 <sup>rd</sup>	360		360		675*	675*
4 <sup>th</sup>		500	540*	540*	900*	900*
5 <sup>th</sup>	540		720		1,125*	1,125*
6 <sup>th</sup>	720			810		
7 <sup>th</sup>		750	900			
8 <sup>th</sup>	900		1,080*	1,080*		
9 <sup>th</sup>		1,000*	1,260			
10 <sup>th</sup>	1,080*					
11 <sup>th</sup>	1,260	1,250				
Subtotal		7 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>
Total		11 <sup>th</sup>		9 <sup>th</sup>		5 <sup>th</sup>

\*: overlapped TBO

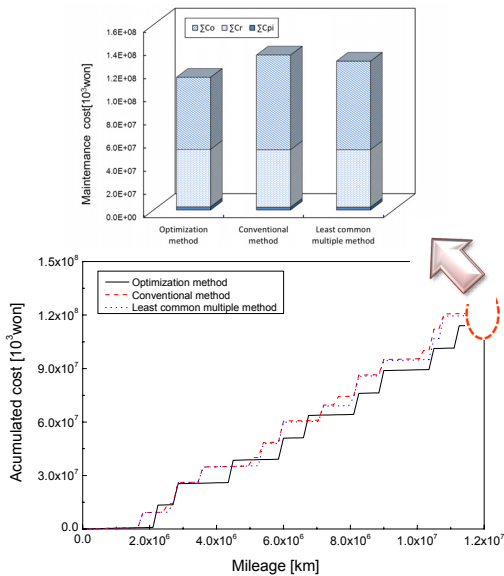


Fig. 10. Comparison of total maintenance costs among 3 methods

#### 4. 결론

본 연구에서는 고속철도차량 일체형 1차 구동장치인 견인전동기와 모터감속기의 정비이력으로부터 신뢰도 중심의 체계적 정비관점에서 최소 정비 비용을 갖는 최적 TBO주기를 산출하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 견인전동기와 모터감속기의 형상모수는 각각 1.0570 및 1.2247로서, 두 구성품의 고장율 유형은 시간 의존적 열화모형인 고장율 증가형이므로 전형적인 예방정비형 구성품이다.
- (2) 각 구성품에 대하여 부품별 고장나무분석과 이의 치명도(심각도, 발생빈도 및 검출도의 기하평균)를 할당하여 신뢰도에 반영하였다. 이로부터 최소 정비비용을 갖는 최적의 완전분해정비주기는 유전자알고리즘을 이용하여 225만km로 산출되었다. 비용 최소화를 위한 철도차량 유지보수 주기 최적화에 유지보수 Data 분석을 통하여 휴리스틱 기법인 유전자알고리즘의 적용 실효성을 확인하므로써 TBO관리 체계를 명확화 할 수 있는 기반을 마련하였다.

#### 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] D. G. Lee, J. W. Kim and H. S. Lee, "A Case Study on Determining Doors Maintenance Intervals through Running Fault Data Analysis for Metro EMU" Journal of the Korean Society for Railway, Vol.26, No.2, pp.1-8, March, 2003.
- [4] I. S. Chung, K. W. Lee and J. W. Kim, "Study on Setting up the Quantitative RAM Goals for Rolling Stocks", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.11, No.4, pp.390-397, June, 2008.
- [5] Y. H. Yu and N. Y. Lee, "A Study on Reliability Centered Rolling Stock Maintenance Methods" Journal of the Korean Society for Railway, Vol.16, No.3, pp.183-188, June, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.183>
- [6] G. H. Kang, "Maintenance of High Speed Rail Vehicles: Theory and Practice", Samsung Publishing, 2009.
- [7] T. Nakagawa and M. Kowada, "Analysis of a System with Minimal Repair and Its Application to Replacement Policy", European Journal of Operational Research, Vol. 12, No. 2, pp.176-182, 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90221-7](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(83)90221-7)
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government, "Railroad Core Component/Device Technology Development Phase 2", Report-15RTRPB084184, 2014.
- [9] Military standard, "Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis", MIL-STD-1629A, 1980.
- [10] ReliaSoft, "Weibull ++7", ReliaSoft User's Guide, 2005.
- [11] 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, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.03.003>

**김 철 수(Chul-Su Kim)**

**[증신회원]**



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

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS

---

**정 진 태(Jin-Tae Jung)**

**[정회원]**



- 1983년 7월 ~ 현재 : 철도청 기계 사무관, 한국철도공사 기술1급
- 2001년 8월 : 한남대 경영대학원 (산업경영학 석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 대학원(교통시스템공학박사과정)

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS