

# CMB접촉기의 교환주기 결정에 관한 사례연구

## A Case Study on Determining the Replacement Interval for the CMB Contactor

박민흥\*                      신백철\*\*                      김철수\*\*\*                      최덕호\*\*\*\*  
Park, Min-Heung              Shin, Baek-Chul              Kim, Chul-Su              Choi, Deuck-Ho

---

### ABSTRACT

As a case study on determining the replacement interval for the CMB contactor, we analyzed a field failure data during 59 months and through the simulation reliability is analyzed. As a result of analyzing the reliability we estimated parameters and analyzed distribution characteristics. Ultimately using the estimated results and applying the Age Replacement Policy considered the cost information, CMB contactor's replacement interval is determined. Through the comparison, analysis between the replacement interval and manufacturing company's, the necessity of replacement interval that is reflected in our operation circumstances is examined.

---

### 1. 서 론

철도차량의 수명은 차량이 제작되어 운행에 투입된 시점부터 폐차되는 시점까지의 기간으로 정의되며, 차량을 정상상태로 유지하기 위해서 차량 각 부품의 수명을 정하여 수명주기가 도래할 때 미리 교체하는 예방정비와 고장이 발생하면 고장난 부품을 교체하는 사후정비로 나누어 검수를 수행한다. 사후 정비의 경우 관련된 부품들이 손상될 우려가 크며 과도한 인력이 소요되어, 열차 운행에 지장을 주는 경우가 발생하므로, 예방정비 위주로 보전업무가 이루어지고 있다. 예방정비를 위한 전제조건은 각 부품의 수명을 산정하는 것이며, 비용을 최소화 하면서 교환주기를 산정하는 것이 중요하다. 주요부품의 교환 주기를 차량의 운용율이나, 성능확보 측면에서 적절한 시점을 고려하여 결정하고 현재 시행되고 있는 검수주기와의 직접적으로 연계하는 방안을 정립함으로써 가장 효율적이며 경제적으로 차량을 관리하는 방안을 모색하는 것이 필요하다. 또한 프랑스와 우리나라의 지리적상이성, 운행방식의 상이점, 또는 차량 보전방식 등을 면밀히 고려하여 우리의 운행상황에 대한 분석을 통한 우리의 실정 및 환경을 반영한 새로운 기준의 교환주기 산정이 필요한 상황이다. 교환주기 결정에 대한 선행연구로 김종운 등[1-2]은 교환과 고정시간 업무의 주기를 결정하기 위한 개념적 모형을 제안하였고, 공조장치의 배기모터의 교환주기 결정 시, 이를 활용하여, RAMS 영향평가 실시 후 교환주기를 조정하였다.

본 연구에서는 철도차량 주요부품인 CMB접촉기의 약 59개월간의 고장이력 자료를 분석하고 시물레이션을 통한 신뢰성분석을 수행하여, 적합한 분포를 찾아내고, 모수를 추정하여 신뢰도 및 분포 특성을 파악한 후, 교환주기를 결정하여 이를 바탕으로 제작사에서 제시한 교환주기와의 비교 분석을 통해 우리나라의 운영환경 및 실정이 반영된 교환주기의 필요성에 대하여 검토하고자 한다.

---

\* 정희원, (사)한국철도차량엔지니어링, 기술연구소, 연구원  
\*\* KORAIL, 수도권철도차량관리단 고속신뢰성관리팀, 차장  
\*\*\* 한국철도대학 차량기계과, 교수  
\*\*\*\* 정희원, (사)한국철도차량엔지니어링, 기술연구소, 소장  
E-mail : tokoch@naver.com  
TEL : (031)269-2077 FAX : (031)269-5453

## 2. 신뢰성 평가를 통한 CMB접촉기의 교환주기 결정

### 2.1 신뢰성 평가

신뢰성 평가를 위해 고장이력자료로부터 적합한 확률분포를 선정하고 확률지 도시 및 검정을 통해 적합도를 검정한 후 모수 추정 및 고장률 형태를 파악하여 CMB접촉기의 교환주기 결정을 위한 기초적인 분석을 수행한다.

#### 2.1.1 고장이력 자료 분석

CMB접촉기는 정상적으로 열려있는 주 접점을 닫거나 또는 정상적으로 닫혀있는 주 접점을 여는 힘이 전자석에 의해 제공되는 전자기 접촉기로서, 직류전원(DC-72V)으로 코일을 여자 시켜 톨러 가동부를 통해 주 접점을 접촉시키는 장치이며, 철도차량에서 모터블록의 송풍 및 발전제동 시, 견인모터를 여자시키는 기능 등을 수행한다. CMB접촉기의 구성은 그림 1과 같다.

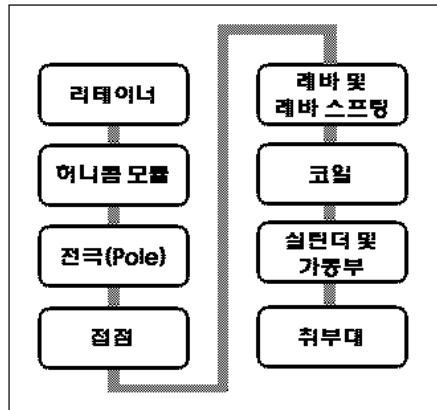


그림 1. CMB접촉기의 구성

그림 1에서 보듯이, CMB접촉기를 구성하는 서브시스템의 고장이 시스템의 고장을 의미하므로 기능 고장을 유발하는 원인들이 직렬구조를 이루고 있는 수리계로 가정하여, 접촉기를 구성하는 서브시스템의 고장 건수를 CMB접촉기의 고장에 의한 부품 교환 건수로 검토하였다. 이를 토대로 제작사의 결함에 의한 초기고장, 설치나 운반 미숙에 따른 품질관리 미숙 및 운영기관의 기술변경 등을 고려하여 약 59개월 동안의 고장이력 자료를 분석하였다. 이 자료는 운영기관의 정보보호를 위하여 본 논문에서는 제시하지 않는다. 본 부품은 편성 당 36개, 총 1656개가 장착되어 있으며, 신뢰성평가에는 고장자료(Failure Data)와 관측중단자료(Censoring Data)가 함께 사용되었다. 시뮬레이션은 Reliasoft사가 개발한 상용 소프트웨어인 Weibull++7을 사용하였다.

#### 2.1.2 적합분포 및 적합도 검정

고장이력자료를 기초로 적합한 분포를 시뮬레이션한 결과 그림 2와 같이 3모수 Weibull 분포, Lognormal 분포, 2모수 Exponential 분포 순으로 나타났으며 1순위이면서 일반적으로 수명분포에 적용되고 있는 3모수 Weibull 분포를 선정하였다. 적합도 검정은 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정절차를 사용하였다. K-S 검정은 고장이력자료에 의해 구한 관측값의 누적고장확률  $F_0(t_i)$ 와 이론분포의 누적분포함수  $F_e(t_i)$ 와의 차의 절대치를 구하여 이중 가장 큰 값을 검정통계량  $D_{CRIT}$ 로 놓고 적합도 허용치  $D$ 와 비교하여  $D_{CRIT} < D$ 이면 유의수준 내에서 가장 한 이론분포를 채택한다. 관측누적고장확률은 중앙 순위법  $F_0(t_i) = \frac{i}{n+1}$ 에 의해 계산하고, 이론분포의 누적분포함수  $F_e(t_i)$ 는 3모수 Weibull 분포의 누적분포함수를 이용한다. 계산된 절대치 값을 유의수준과 샘플링 수를 고려하여 검정한다. 본 연구에서는

시뮬레이션에 의해 적합도를 검정하였으며, 적합도 검정결과를 그림 3에 표현하였다. 시뮬레이션 결과 K-S검정 값이 0에 가까우면, 관측 값과 이론분포가 적합한 것으로 판단한다. 선정된 3모수 Weibull 분포에 대한 Kolmogorov-Smirnov 검정 결과 값이 0%에 근사하고, 도표 1의 확률지에 도시한 누적분포 함수가 직선을 나타내므로, 가정한 분포는 적합한 것으로 판단하였다.

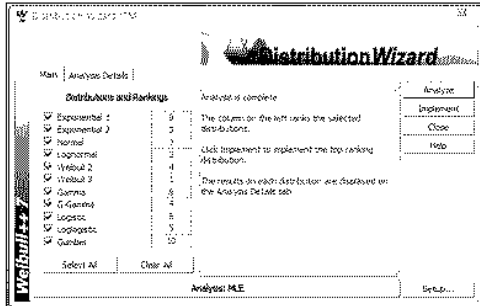


그림 2. 적합분포 결과

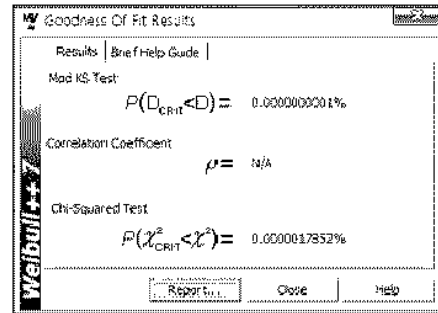


그림 3. 적합도 검정결과

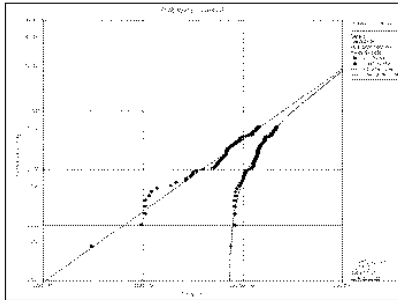
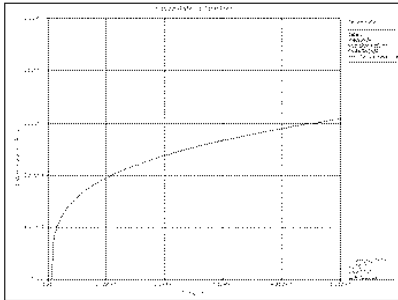
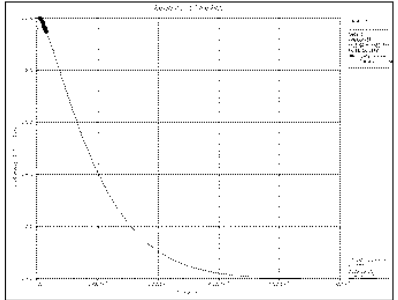
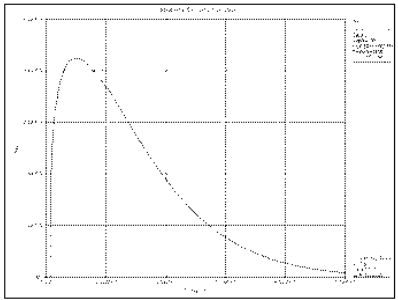
### 2.1.3 모수추정 및 분포특성 분석

3모수 Weibull 분포로 적합하여, 최우추정법을 사용하여 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 확률 밀도 함수는 아래 식과 같으며,

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}, (t \geq 0)$$

여기서, 형상모수( $\beta$ ), 척도모수( $\eta$ ), 위치모수( $\gamma$ )는 양수이고 고장시간을 나타내는  $t$ 는 양수이며 위치모수( $\gamma$ )보다 크다 ( $t \geq \gamma \geq 0$ ). 표 1은 모수추정 및 분포특성을 분석한 것으로 척도모수( $\eta$ )는  $1.4483 \times 10^7$ , 위치모수( $\gamma$ )는  $7.2054 \times 10^5$ , 형상모수( $\beta$ )는 1.2765 으로 추정되었다. 척도모수( $\eta$ )는 언제나 누적분포함수  $F(x)$  즉 고장확률이 0.632가 되는  $x$ 값을 나타내고 있으므로 특성수명을 의미하며, 일반적으로 값이 크면 전체적인 수명이 길고, 작으면 전체적인 수명이 짧은 것으로 판단한다. 형상모수( $\beta$ )는 무차원의 수로 값의 크기가 분포의 형태를 결정한다. 본 연구에서 추정된 형상모수( $\beta$ )값은 1.2765로 고장률이 증가하는 형태라는 것을 직관적으로 알 수 있다. 위치모수( $\gamma$ )는 일반적으로 최소수명의 의미를 갖는다. 표 1의 Graph를 통해 고장시간에 따른 Weibull확률지에서의 누적확률분포를 확인할 수 있고, 고장시간에 따른 신뢰도, 고장밀도함수 및 고장률의 추이를 확인할 수 있다. 특히 고장률의 형태를 살펴보면 고장률이 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 현재까지의 고장 경향이 향후로도 계속될 것으로 가정하여 백분위 수 중  $B_{10}$  수명을 예측 하였고, 예측 결과는 3,205,100 Km이다.

표 1. 모수추정 및 분포특성 분석

적합분포	3모수 Weibull		
모수추정	척도모수 ( $\eta$ ) = $1.4483 \times 10^7$ 형상모수 ( $\beta$ ) = 1.2765 위치모수 ( $\gamma$ ) = $7.2054 \times 10^5$		
확률지 도시		고장률	
신뢰도		고장밀도 함수	
$B_{10}$ 수명	3,205,100 Km		

2.1.4 누적분포함수 및 신뢰도함수

신뢰성분석 결과로 추정된 결과를 이용하여 누적분포함수(F(t))와 신뢰도함수(R(t))를 구하면 아래 표 2와 같다.

표 2. 누적분포함수 및 신뢰도함수

추정된 모수	척도모수 ( $\eta$ ) = $1.4483 \times 10^7$ 형상모수 ( $\beta$ ) = 1.2765 위치모수 ( $\gamma$ ) = $7.2054 \times 10^5$	
F(t) 누적분포함수	원식 $F(t; \beta, \eta, \gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	산출식 $F(t; \beta, \eta, \gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t-7.2054 \times 10^5}{1.4483 \times 10^7}\right)^{1.2765}}$
R(t) 신뢰도함수	원식 $R(t; \beta, \eta, \gamma) = 1 - F(t; \beta, \eta, \gamma)$ $= e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	산출식 $R(t; \beta, \eta, \gamma) = e^{-\left(\frac{t-7.2054 \times 10^5}{1.4483 \times 10^7}\right)^{1.2765}}$

## 2.2 교환주기 결정

CMB접촉기에 대한 신뢰성 분석결과에 기초하여 부품교체정책을 적용하여 교체주기를 산출한다. 본 연구에서는 부품교체정책 중 부품이 고장 나거나, 또 고장 나지 않았더라도 설치 후 T시간이 경과했을 때 부품을 교체해주는 수명교체정책(Age Replacement Policy)을 고려하여 교환주기를 결정하였다. 최소 기대비용을 나타내는 시점이 최적 기회교체시점이 되므로, 고장부품을 교체할 때마다 소요되는 비용 ( $C_f$ )과 예방보전계획에 의해서 고장 나지 않은 부품을 교체할 때 소요되는 비용( $C_p$ )을 고려하여 단위 시간당 기대비용을 최소화하는 교체시간( $T_0$ )을 구한다. 단위시간당 교체비용 식은 아래와 같으며, 해당 보수품의 사후보전 시 소요되는 비용과 예방보전 시 소요되는 비용을 합하여 교체 시 소요되는 총비용을 나타냈고, 이 총비용을 평균수명으로 나누어 결과적으로 단위시간당 기대비용을 나타냈다.

$$C(T_0) = \frac{C_f F(T_0) + C_p R(T_0)}{\int_0^{T_0} R(t) dt}$$

이식에서,  $F(T_0)$ 는 누적분포함수를  $R(T_0)$ 는 신뢰도함수를 의미하며,

3-Weibull 분포의 누적분포함수는  $F(t; \beta, \eta, \gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t - 7.2054 \times 10^6}{1.4483 \times 10^7}\right)^{1.2766}}$  이고, 신뢰도함수는  $R(t; \beta, \eta, \gamma) = e^{-\left(\frac{t - 7.2054 \times 10^6}{1.4483 \times 10^7}\right)^{1.2766}}$  이다.

교체를 위한 총비용을 산출하기 위해서는 자원과 고장기간이 화폐단위로 환산되어야 한다. 이에 박경수(신뢰도 및 보전공학)는 사용중 고장이나 계획교체의 경우 단위 비가용기간당 기회비용을 알 수 있다고 가정하면서, 계획교체 및 비계획교체에 따르는 단위 비가용기간당 기회비용을  $O_p$  및  $O_f$ 라 하고, 계획교체 및 비계획교체에 따르는 장비 비가용 기간을  $t_p$  및  $t_f$ 라 하며,  $W_p$  및  $W_f$ 를 계획교체 및 비계획교체에 직접 소요되는 비용이라 가정하여 계획교체에 소요되는 총비용  $C_p$ 는  $C_p = O_p \cdot t_p + W_p$ 로 비계획교체에 소요되는 총비용  $C_f$ 는  $C_f = O_f \cdot t_f + W_f$ 로 제시하였다. 이에 고장률이 증가하는 형태로 교환주기 결정이 가능한 CMB접촉기는 고장 시 소요되는 비용과 예방교체 시 소요되는 비용의 비( $\frac{C_f}{C_p}$ )를 2로 결정하여 단위시간당 교체비용 식을 최소화하는 교환주기를 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 시뮬레이션은 상용 소프트웨어인 MATLAB을 이용하였고 교환주기는 6,059,500 Km로 예측되었다.

제작사에서 제시한 교환주기가 허용고장률을 감안하여  $B_5$ ,  $B_{10}$  등의 수명에 근거한 것인지, 아니면 실제 환경을 고려하여 획득한 자료에 의한 것인지, 이에 대한 산출 근거를 명확히 알 수 없지만, 본 연구에서는 우리나라의 운영환경 및 실정이 반영된 고장이력자료를 토대로 비용정보를 고려한 수명교체정책을 적용하여 교환주기를 예측하였다.

표 3에 예측된 CMB접촉기의 교환주기와 제작사인 A사에서 권고하고 있는 교환주기를 비교하였으며, 예측된  $B_{10}$  수명을 명기하였다. 예측된 교환주기는 제작사에서 권고한 교환주기보다 약 2배가량 늘어난 것으로 표 1의 고장률 Graph에서, 추정된 형상모수( $\beta$ )가 1.2765로 1보다 크므로 증가하는 형태이지만 그 값이 작게 추정되어 예측된 고장률함수의 형태가 증가하는 경향은 보이나, 시간에 따른 고장률 증가량이 점차 감소하는 형태로 결국 고장률이 일정해지는 결과를 보이기 때문에 이에 따라 고장확률 0.632가 되는 시간을 의미하고 전체적인 수명을 나타내는 척도모수( $\eta$ )가  $1.4483 \times 10^7$ 으로 비교적 큰 값으로 예측되었기 때문으로 판단된다. 또한, 관측중단 시점이 59개월임을 감안했을 때, 현 시점에서는 59개월 동안 발생한 고장이력자료를 토대로 초기 및 우발기간의 고장률은 파악할 수 있지만, 이 시점 이후로 고장률의 변화를 단정하기에는 자료의 수가 부족하다고 판단됨에 따라, 고장의 경향을 좀 더 관측하고,

좀 더 많은 고장이력 자료가 수집된 후 이 시점 이후의 신뢰성 분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

표 3. 예측된 CMB접촉기의 교환주기 및 제작사 권고치와의 비교

구 분	교환주기(Km)	$B_{10}$ 수명(Km)
제작사 권고치	3,000,000	-
고장이력자료에 의한 예측치	6,059,500	3,205,100

### 3. 결 론

본 연구에서는 철도차량 주요부품인 CMB접촉기의 교환주기 결정에 관한 사례연구로서, 59개월간의 부품에 대한 고장이력자료에 대한 신뢰성 평가를 시뮬레이터를 이용하여 수행하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 고장이력자료를 분석하여, 시뮬레이션으로 분포 적합 및 적합도 검증을 실시한 결과 3-모수 Weibull 분포로 적합 되었으며, 3-모수 Weibull 분포에 적합하여 추정된 모수 값은 척도모수 ( $\eta$ ) =  $1.4483 \times 10^7$ , 형상모수 ( $\beta$ ) = 1.2765, 위치모수 ( $\gamma$ ) =  $7.2054 \times 10^5$ 이다.

- 고장률이 증가하는 형태로 교환주기 결정이 가능한 본 부품에 대하여 우리나라의 운영환경 및 실정이 반영된 고장이력자료를 토대로 비용정보를 고려한 수명교체정책을 적용하여 교환주기를 예측하였다. 시뮬레이션으로 예측한 교환주기는 6,059,500 Km 로서, 제작사에서 권고한 3,000,000 Km와 비교하여 2배가량 늘어난 수치이며, 참고로 부품의 신뢰성 척도로서 많이 사용되는 백분위수  $B_{10}$ 수명은 3,205,100 Km로 예측되었다.

실질적인 현장 적용가능성을 높이기 위해 부품의 고장 경향을 지속적으로 관측하고, 조금 더 많은 고장이력자료가 수집된 후 신뢰성 분석을 수행하고, 수명교체정책에 필요한 비용정보에 대한 면밀한 분석이 수반되어야 할 것이다. 향후 본 논문의 신뢰성 분석결과를 기초로 필요정보를 획득하여 RAMS 영향 평가에 대해 연구할 예정이며 준비 중에 있는 CMB접촉기의 가속수명시험을 통하여, 고장이력자료에 의해 예측된 결과와 실제 시험을 통한 결과를 종합적으로 비교분석할 예정이다.

## 감사의 글

본 논문은 한국철도공사의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김종운, 박준서, 신백철, 김재훈 (2008), "철도차량의 주기적 교환품의 교환주기 결정에 관한 사례 연구", 한국철도학회
2. 김종운, 박준서, 이호용, 김재훈 (2008), "철도시스템의 RAMS 중심의 유지보수 정책결정을 위한 개념적 절차", 한국철도학회논문집, 제11권 1호, pp.19-25.
3. 이덕규, 김종운, 이희성 (2008), "불완전 유지보수 모형을 통한 전동차 도어장치 예방유지보수 주기 산정에 관한 연구", 한국철도학회 2008년 춘계학술대회논문집 pp.727-735
4. 이덕규, 이희성, 2008, "시뮬레이션을 통한 불완전 유지보수하에서의 유지보수 정책의 효율성 평가에 관한 사례연구" 한국철도학회 2008년 춘계학술대회논문집 pp.1539-1544
5. 박경수 (1999), "신뢰도 및 보전공학", 영지문화사.
6. 김준홍, 정 원 (2007), "신뢰성공학", 청문각
7. 김철수, 강길현 (2008), "철도신뢰성공학", 한국철도대학
8. 송지호, 박준협 (2007), "신뢰성공학 입문", 인터비전
9. 신승훈 (2003), " 와이블 차트와 가속시험", 과학기술