

## 노후신호장치의 수명평가방안에 관한 연구

**이재호, 신덕호, 이강미, 신경호**  
한국철도기술연구원

### A method of life assessment for a decrepit signaling equipment

Jae-Ho Lee, Ducko Shin, Kang-Mi Lee, Kyeong-Ho Shin  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - 전자부품으로 구성된 제어기의 신뢰성에 대한 연구는 미국방부를 중심으로 1960년대부터 연구되었으며, 철도에서는 유럽을 중심으로 1990년대부터 연구되었다. 특히, 한국에서는 2000년대 이후부터 신호설비 신뢰성에 대한 연구가 시작되어 과거 신뢰성 정보가 없는 노후 신호설비를 대상으로 효율적인 유지보수를 위한 수명평가가 요구되고 있다. 본 연구에서는 부품단위 고장률 또는 운영시 발생된 고장정보와 같이 신호설비의 신뢰도가 지속적으로 모니터링 및 분석정보가 존재하지 않고 장기간 사용된 노후신호설비에 대한 수명을 예측하기 위한 방안을 제시한다.

이므로 운행조건에 따라 가중치를 주어 평가해야 한다. 이러한 부품고장별 영향을 분석하여 MTBF와 MTBSF관련 고장률을 분류하는 작업이 FMEA이며, 일반적으로 부품고장에 대한 FMEA보고서가 없고, 생산시기가 오래되어 설계에 참여한 인력의 인티뷰를 진행할 수 없는 장치는 부품단위 FMEA의 실시가 불가능하므로 보수적 데이터분석을 통해 MTBF만을 수명평가의 기준으로 사용한다.

MTBF는 고장률( $\lambda$ )의 역수인 MTTF와 수리율( $\mu$ )의 역수인 MTTR의 합으로 정의되지만, 일반적으로 10,000시간 이상인 MTTF를 기준으로 할 때 2시간 내외의 MTTR은 무시할 수 있는 수준이므로 식 1과 같이 MTBF를 고장률이 역수로 근사하여 사용한다.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (식 1)$$

고장률을 상수로 평가하는 것은 전자부품의 고장특성이 우발고장(Random Failure)의 형태를 나타내기 때문이다. 우발고장은 어떠한 전조 없이 고장이 임의로 발생하는 상태를 의미한다.

신뢰도예측은 부품단위 고장률을 상수화하여 장치의 MTBF를 예측하는 과정으로써, 사용된 부품의 종류에 따라 MIL-HDBK-217FN2 등의 규격에서 제공하는 방정식을 사용하여 부품단위 고장률을 예측하고, 부품이 조합된 카드와 카드가 조합된 장치의 고장률을 합하거나 여분구조를 갖는 경우 모델링을 통해 전체 장치의 고장률 및 MTBF를 예측한다.

초기에 예측된 상수 고장률이 이론적으로 변하지 않는다고 가정하면 장치의 수명은 영원하다. 따라서 장치의 동작 중에 수집된 누적고장정보를 분석하여 고장률의 변화를 지속적으로 관리해야 한다. 하지만 예측고장률을 사용하는 이유는 장치의 수명주기 중 설계 및 제작과정에서는 실제 운영환경에서 수집된 고장정보를 확보할 수 없으므로, 신뢰도예측이 정량적으로 주어지는 신뢰도목표의 만족여부를 평가하는 유일한 방법이기 때문이다. 또한 상수고장률 예측과정에 필요한 데이터인 부품종류, 용량, 품질, 부하, 온도특성 등을 충실히 입력하는 경우 실제 운영환경에서 수집된 누적고장정보를 이용한 고장률과 거의 일치하므로 예측고장률은 현재까지의 운영을 통한 누적고장정보가 없는 장치의 신뢰도를 평가하기 위한 기준으로 사용되고 있다(1).

### 1. 서 론

수명평가 또는 연장의 개념은 주로 원자력 발전소 또는 거대 시스템 설비(Plant) 등에 제한적으로 적용하였으나, 점차적으로 산업계 전반에 확대 적용되고 있는 추세이다. 수명연장을 고려해야 하는 가장 중요한 문제는 여러 가지 고장 원인에 대한 비용-편익(Cost-Benefit)분석에 의해 수명연장의 방법이 효율적이라고 판단되는 경우이다. 더욱이, 철도에서는 시간의 경과에 따라 부품의 조달문제 등으로 새로운 설비를 도입해야 하거나 현재 사용 중인 설비를 계속 사용해야 할지 여부를 결정해야 하는 문제가 자주 발생하고 있다.

여기에서는 부품단위 고장률 또는 운영시 발생된 고장정보와 같이 신호설비의 신뢰도가 지속적으로 모니터링 및 분석정보가 존재하지 않은 20년 이상 사용된 노후신호설비에 대한 수명을 예측하기 위한 방안을 제시한다.

그 절차로는 우선 대상으로 설비의 부품단위 신뢰도를 MIL-HDBK-217FN2로 산출하고, 이렇게 산출된 예측수명을 설계수명으로 가정하고 잔존수명을 계산한다. 이 때 잔존수명을 얻기 위해서는 신호설비의 고장유형별 비율을 계산하여 217F Plus에서 제시된 모수를 사용한다. 산출된 잔존수명합수를 이용하여 잔존수명을 평가하고 그 값이 현재 고려하는 수명연장기간을 만족하는지를 확인한다.

확인된 수명연장기간을 입증하기 위한 방안으로 무 고장 보증시험시간을 결정하고 이를 바탕으로 가속보증 시험시간 및 가속계수를 산출하고 이를 바탕으로 가속시험을 수행하여 평가하는 모델을 개발한다. 개발된 모델은 노후신호설비를 운영하는 철도운영기관이 미래의 유지보수정책을 수립하기 위해 활용될 것이다.

### 2. 본 론

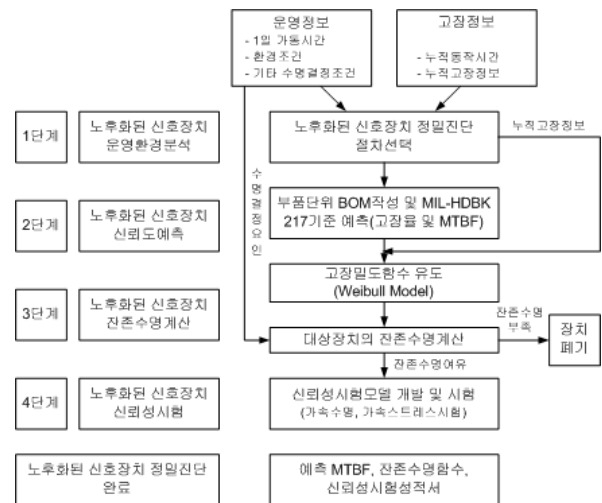
#### 2.1 신호장치의 진단

장기간의 사용으로 노후화된 신호장치의 정밀진단은 <그림 1>과 같이 신뢰성정보가 존재하지 않는 상태에서 장치를 부품수준에서 분석하여 장치의 고장률 및 MTBF를 예측하고, 운영환경에서 발생하는 전자장비의 고장패턴을 적용하여 잔존수명을 계산한 후, 향후 사용가능한 시간을 확인하기 위하여 신뢰성 시험 모델을 개발과 이를 바탕으로 신뢰성시험(가속수명시험 또는 가속스트레스시험)을 수행하는 방법이다.

#### 2.1.1 신호장치의 신뢰성

전자부품으로 구성된 신호장치의 신뢰성은 MTBF와 MTBSF로 정량화된다. MTBF는 장치의 수명 동안 고장이 발생하는 평균시간이며, MTBSF는 장치의 수명 동안 서비스고장이 발생하는 평균시간이다. 따라서 MTBF와 MTBSF의 차이는 고장정의에 종속된다. 일반적으로 MTBF는 장치에 기대된 기능의 상실로 고장을 정의하며, 서비스고장은 고장영향으로 인한 열차 운행지연발생 유무를 기준으로 정의한다.

예를 들어 정밀진단 대상 장치에서 하부장치인 전원공급장치의 고장 결과는 기능상실 뿐만 아니라 열차 운행지연을 발생시키므로 MTBF 및 MTBSF에 공통되는 요인이며, 하부부품을 구성하는 회로의 부품고장 등은 고장발생이 열차운행지연과 직결될 수도 있고, 그렇지 않을 수도



<그림 1> 노후화된 신호장치의 정밀진단절차

#### 2.1.2 신호장치의 신뢰성예측

신뢰도예측은 대상 장치의 하드웨어 구성에 따라 그 특성이 다르므로

각 구성요소의 특성을 고려하고 장치의 기능상실에 따른 신뢰도 블록 다이어그램을 작성하고 각 구성요소단위 고장률을 예측하여 전체시스템의 고장률 및 MTBF를 예측해야 한다.

MIL-HDBK-217FN2에서는 전자부품 종류에 따라 각각의 고장률예측을 위한 방정식을 제시하고 있다. 따라서 일반적으로 시간적인 효율성과 체계적인 검토가 쉬운 MIL-HDBK-217FN2등을 근거로 전자부품의 고장률을 예측하는 상용소프트웨어 프로그램 사용을 권장한다.

### 2.1.3 신호장치의 잔존수명평가

잔존수명은 대상 장치의 신뢰성이 계획된 예방유지보수 임무의 실시 주기까지 남아있는 시간이다. 또한 노후화된 신호장치와 같이 전자부품으로 구성된 제어기의 예방유지보수는 RCM2 등의 이론에서 교체예방유지보수 임무로 정의하고 있으며, 예방유지보수 임무의 실시주기는 운영기관의 유지보수 정책에 따라 다양하게 적용하고 있다. 따라서 노후화된 신호장치를 운영기관이 장치별 구성요소의 고장(기대된 기능요구사항의 상실)정보를 누적하여 관리하고 있지 않은 경우에는 신뢰도 예측치를 기준으로 지수모델의 신뢰성함수를 적용하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 이론은 MTBF예측치의 산출기준이 되는 상수고장률이 실제 운영형태와 정확히 일치하는 이상적인 상태임을 전제로 하고 있기 때문에 선진국의 운영기관에서는 FRACAS 등의 방법을 동원하여 장치의 실제 고장률을 주기적으로 갱신하여 장치상태를 보다 정확하게 반영하는 MTBF정보를 예방유지보수 임무주기 결정에 사용하고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 장치의 누적고장정보를 관리하고 있지 않으며, 잔존수명 평가에 기준이 되는 장치폐기에 대한 신뢰성기준도 정량적으로 제시하고 있지 않는 장치의 잔존수명은 동일한 응용분야 장치들의 고장정보를 RAC에서 발행한 217 Plus의 일반적 고장정보를 기준으로 해석하여 향후의 고장률 변화를 추정한다(2).

〈표 1〉 고장원인별 형상모수

	고장원인	비율	형상 모수
1	Part Defect	0.298557159	1.62
2	Manufacturing Defect	0.188679245	0.96
3	Design	0.096559378	1.29
4	System Management	0.014428413	0.64
5	Wearout	0.107658158	1.68
6	Induced	0.110987791	1.58
7	No Defect	0.154273030	1.92
8	Software	0.028856826	0.7

잔존수명의 수학적 정의는 신뢰도가 Zero상태에 도달하기 직전까지를 생존으로 정의하여 (식 2)와 같이 신뢰도함수에 따라 잔존수명함수 m(t)로 표현된다.

$$m(t) = \frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} R(u) du \dots \dots \dots (식 2)$$

(식 2)에서 m(t)는 t에서의 잔존수명이다. 즉, 현재 시간 t까지 생존하고, 다음 임의의 시점까지 생존할 평균값이다. 따라서 (식 2)를 대상 장치에 적용하기 위해서는 217 Plus의 누적고장정보 분석결과를 반영하기 위해 Weibull 함수형태로 변환해야 한다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \dots \dots \dots (식 3)$$

$$MTBF = \eta \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \dots \dots \dots (식 4)$$

(식 3)에서 형상모수 β는 217 Plus의 고장유형별 형상모수를 사용하며, 척도모수 η는(식 4)와 같이 대상 장치의 MTBF정보를 대입하여 산출한다. 최종적인 잔존수명함수는 다음과 같이 표현되며, 이식을 적용하여 잔존수명을 계산한다.

$$m(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^s p_i R_i(t)} \sum_{i=1}^s \left[ p_i \eta_i \Gamma \left[ \frac{1}{\beta_i + 1}, \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i} \right] \right] - t \dots \dots \dots (식 5)$$

(식 5)에서 대상 장치의 현재까지의 동작시간을 반영하면 신뢰도가 Zero가 될 때까지의 시간을 추정할 수 있다. 잔존수명의 계산결과를 정리하면 예측MTBF(상수고장률에 의해 피시험체의 약63%가 고장나는 시간)를 기준으로 RAC의 217 Plus에서 제공하는 유사시스템 고장유형을 기준으로 평가했을 때, 현재 시점에서 신뢰도가 Zero(주어진 시간에 기능을 정확히 수행할 확률이 0)가 될 때까지의 평균시간을 산정한다.

### 2.2 잔존수명 입증

전자부품 고장률에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 동작온도이다. MIL-HDBK-217FN2의 부품종류별 고장률예측 방정식에서도 부품의 종류에 관계없이 포함되는 것이 환경조건관련 Pi-Factor이다. 이를 입증하

기 위해 대상 장치의 온도변화에 따른 MTBF를 MIL-HDBK-217FN2를 기준으로 예측한다. 이러한 온도변화에 따른 MTBF 및 고장률의 변화를 이용하여 장치의 신뢰성을 가속하여 시험하는 방식으로 가속스트레스시험과 가속수명시험이 있다.

신뢰성시험은 부품별 온도스트레스에 따른 활성화 에너지를 고려하여 가속계수를 선정 후 가속된 시험시간동안 피시험체에 시험을 수행하며, 가속수명시험과 가속스트레스시험의 차이는 피시험체에 가해지는 시간과 동작여부에 의해 결정된다. 가속수명시험은 피시험체가 동작불능이 될 때까지 지속적인 시험을, 가속스트레스시험은 정해진 시간동안 정상 동작을 유지하면 시험시간에 가속계수를 고려한 만큼의 정상동작을 보장하는 논리로 적용된다.

상온과 비교하여 피시험체가 신뢰성시험 동안 노출되는 온도가 높을수록 가속계수가 커지지만 사용된 부품의 허용온도를 초과하게 되면 정상동작을 보증하는 범위를 벗어나므로 신뢰성시험에서는 일반적인 전자부품의 허용 온도를 고려하여 산정하고 이를 기준으로 장치의 고장률을 예측하기 위해서는 (식 6)과 같이 가속계수를 산출해야 한다.

$$AF_{device} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{eA}{k} \right) \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \dots \dots \dots (식 6)$$

eA : 활성화 에너지(부품종류별로 상이)  
 k : 볼츠만 상수(고정상수  $8.623 \times 10^{-5} eV \cdot K^{-1}$ )  
 $T_n$  : 정상온도+절대온도(273),  $T_s$  : 가속온도+절대온도(273)

(식 6) 적용하기 위해 대상 장치의 부품별 활성화 에너지 및 가속계수를 계산한다. 활성화에너지는 Telcodia규격을 근거로 한다.

최종적으로 시험시간 산출식을 근거로 신뢰수준별 시험시간은 (식 7)에서 산출된다. 신뢰성시험시간의 산출을 위해 (식 7)을 적용하는 것은, 통계에 의존하는 시험의 특성상 신뢰수준에 따라 시험시간이 다르기 때문이다.

$$t = m_e \left( \frac{\chi_{1-\alpha,2}^2}{2 \times n} \right) \dots \dots \dots (식 7)$$

t : 신뢰수준을 고려한 시험시간  
 $m_e$  : 보증하고자 하는 동작시간  
 $\chi_{1-\alpha,2}^2$  : 자유도가 2이고 신뢰수준이  $1-\alpha$ 인 통계표의 수치( $\alpha$ 는 시험시간의 추정치가 틀릴 확률)  
 $2 \times n$  : 피시험체 수량(2 set)

위 식을 적용하여 대상 장치의 신뢰수준별 시험시간을 구하고 피시험체를 챔버에 넣어서 시험을 시행한다. 시험시간과 관련하여 전자부품으로 구성된 국내의 신뢰성시험의 사례를 조사한 결과 신뢰수준 60~70% 수준을 일반적으로 사용하고 있다(3).

## 3. 결 론

본 연구는 장기간 사용으로 노후화된 신호장치 특히, 부품단위 고장률이나 운영시 발생된 고장정보와 같이 신호설비의 신뢰도가 지속적으로 모니터링 및 분석정보가 존재하지 않은 노후 신호장치에 대한 수명을 예측하기 위한 방안을 제시하였다. 그 절차로는 우선 대상으로 설비의 부품단위 신뢰도를 MIL-HDBK-217FN2로 산출하고, 이렇게 산출된 예측수명을 설계수명으로 가정하고 잔존수명을 계산한다. 이 때 잔존수명을 얻기 위해서는 신호설비의 고장유형별 비율을 계산하여 217 Plus에서 제시된 모수를 사용한다. 산출된 잔존수명함수를 이용하여 잔존수명을 평가한다. 마지막으로 확인된 잔존 수명을 입증하기 위한 방안으로 신뢰성시험을 위한 파라미터를 산출하고 이를 바탕으로 신뢰성시험을 수행하여 평가하는 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 노후신호설비를 운영하는 철도운영기관이 미래의 유지보수정책을 수립하기 위해 활용될 것이다.

### [참 고 문 헌]

[1] U.S. Department of Defense, "MILITARY HANDBOOK Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1991.12.02  
 [2] RiAC, "Handbook of 217 Plus Reliability Prediction Models", 2006  
 [3] 한국전기연구원, "2006부품소재 신뢰성향상사업 전기분야 기술위원회", 2006  
 [4] 이재호외, "A Study on the Reliability Demonstration of ATC and IXL for Korea High Speed Train", ICEE 2007