

## 노후신호장치 잔존수명 평가에 관한 연구

### A Study on the Assessment of Residual Life Span for Old Type Signalling Equipment

신덕호<sup>†</sup> · 이재호\* · 신경호\*\* · 김용규\* · 강민수\*\*\*

Ducko Shin · Jae-Ho Lee · Kyung-Ho Shin · Yong-Kyu Kim · Min-Soo Kang

**Abstract** The reliability of control system composed of electronic parts has been studied by DoD since 1960, and has been undertaken mainly by Europe for railways. Especially in Korea, a study on reliability of signalling equipment has been taken since 2000, requiring reliability test for effective maintenance of old type signalling equipment which no longer has information on its past reliability. This study evaluates the reliability test in units of parts for old type signalling equipment; for instance, failure rate in units of parts, or failure data during operation; which was utilized without its consistent reliability monitoring and analysis data for over 20 years. Also, reliability change at this point in time has been estimated by using residual life span function, and a model which can evaluate the possibility of extended operation through stress acceleration test has been developed. This model will be utilized to establish future maintenance policy for train operating company's operation on old type signalling equipment.

**Keywords** : Reliability Assessment, Residual Life Span, Old Type Signalling Equipment

요 지 전자부품으로 구성된 제어기의 신뢰성에 대한 연구는 미국방부를 중심으로 1960년대부터 연구되었으며, 철도분야에서는 유럽을 중심으로 1990년대부터 연구되었다. 특히 한국에서는 2000년대 이후부터 신호설비 신뢰성에 대한 연구가 시작되어 과거 신뢰성정보가 없는 노후신호설비를 대상으로 하는 효율적인 유지보수를 위한 신뢰도 평가가 요구되고 있다. 본 논문에서는 부품단위 고장률 또는 운영시 발생된 고장정보와 같이 신호장치의 신뢰성이 지속적으로 감시 및 분석되지 않고 25년 이상 사용된, 노후신호장치를 대상으로 부품단위 신뢰도를 평가하고, 잔존수명함수를 사용하여 현재시점에서의 신뢰도변화를 예측하였으며, 연장사용이 요구되는 기간에 대한 가속스트레스시험을 통해 연장사용의 가능성을 평가하는 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 노후신호설비를 운영하는 철도운영기관이 미래의 유지보수 정책을 수립하기 위해 활용될 것이다.

주 요 어 : 신뢰성평가, 잔존수명, 노후신호장치

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

본 논문은 노후된 ATS차상장치(서울메트로 2호선)의 잔존수명을 평가하고, 연장사용기간 동안의 무고장 입증을

위한 절차개발에 관한 연구이다. 전자부품으로 구성된 신호설비의 고장률은 운영환경 및 조건에 따라 변경되므로 초기 설치시에 평가된 고장률의 변화 추이는 지속적인 모니터링을 통해 예방유지보수 및 교체주기가 주기적으로 재조정되어야 한다. 현재는 차량전장품의 경우 차량의 폐차주기 등과 관련된 법률 및 운영기관 규정에 의해 일괄적으로 교체[1]가 수행되고 있어서 교체시간까지 발생하는 빈번한 고장이 운영효율을 저하시킴에도 교체를 위한 별도의 신뢰성변화추이를 바탕으로 하는 관리가 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 부품단위 고장률 또는 운영시 발생된 고

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 열차제어통신연구실, 선임연구원

E-mail : ducko@krii.re.kr

TEL : (031)460-5442 FAX : (031)460-5449

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 열차제어통신연구실, 책임연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 열차제어통신연구실, 선임연구원

\*\*\* 정희원, 한국산업기술평가관리원, PD

장정보와 같이 신호장치의 신뢰성이 지속적으로 모니터링 및 분석되지 않고 25년 이상 사용된, 노후신호장치를 대상으로 잔존수명을 평가하기 위한 모델을 개발하였으며, 개발된 모델을 서울메트로 2호선 ATS장치에 적용하여 25년 이상 사용된 현재의 잔존수명을 평가하고, 개량을 위해 요구되는 연장사용기간인 향후 3년간의 무고장 여부를 가속 수명시험을 통해 입증하였다.

## 2. 노후신호장치 잔존수명평가

### 2.1 잔존수명평가 모델개발

본 논문에서 제시하는 잔존수명평가 모델은 운영기간동안 발생된 고장정보를 포함하는 신뢰성정보가 존재하지 않는 상태에서 노후신호장치를 부품수준으로 분석하여 장치의 고장률 및 MTBF(Mean Time Between Failure)를 예측하고, 운영환경에서 발생하는 전자장비의 고장패턴을 적용하여 잔존수명을 계산한 후, 향후 3년간 무고장으로 시스템을 연장 사용하는 것에 대한 확인을 신뢰성시험 수행을 통해 입증하는 Fig. 1과 같은 모델이다.

잔존수명은 장치가 정량적 폐기기준 신뢰도에 도달하는 잔여시간이다[2]. 이때 폐기기준은 신뢰도함수 및 MTBF 등으로 정의된다. 예를 들어 주기적으로 대상장치의 신뢰도를 운영시간 및 수량을 고려하여 계산하면 운영시간에 따라 고장률이 증가함을 알 수 있다. 고장률의 증가는 MTBF의 단축을 의미하므로 갱신된 고장정보가, 사전에 정의된 MTBF에 도달하면 시스템이 수명을 다한 것으로 판단하거나, 고장률이 사용시간에 따라 변하지 않는다고 가정하는 경우에는 신뢰도함수를 적용하여 시간에 따른 시스템 신뢰도가 50% 이하가 되는 경우 시스템이 수명을 다한 것으로 판단하는 등의 시스템 수명에 대한 기준이 필요하다.

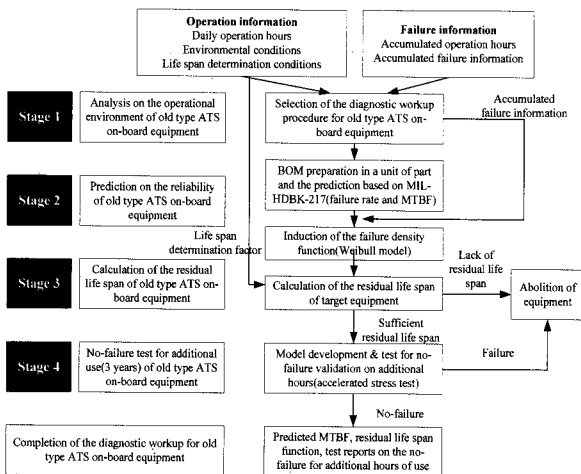


Fig. 1. Developed model for assessment process of residual life span

Fig. 1의 운영환경 분석은 잔존수명평가 대상에 대한 운영정보(1일 가동시간, 환경조건, 수명결정조건) 및 고장정보(누적사용시간)를 수집하여 대상에 적합한 정밀진단 절차를 선택하는 단계이다.

본 논문의 분석대상인 서울메트로 2호선 구형ATS차상장치의 경우 잔존수명을 평가를 위한 운영기관의 폐기기준이 정의되지 않았으므로, 현재 상태에서 구형 ATS차상장치의 3년 연장사용의 가능여부를 확인하도록 모델을 설계하였다.

Fig. 1의 1단계에서 구성된 절차에 따라 구형 ATS차상장치의 잔존수명평가는 부품단위 고장률을 MIL-HDBK-217FN2을 기준으로 예측[3]하고, 예측된 MTBF를 바탕으로 잔존수명을 계산하여 현재상태의 수명을 추정한 후 연장사용시간 3년에 대한 무고장시험을 실시하여 그 사용가능성을 확인하였다. 구형ATS차상장치 운영 및 고장정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Operation and failure information of target equipment

Classification	Necessary information	Collected contents
Operati-on information	Daily operation hours	Daily average 10-12 hours(maximum 15 hours) Duration is applied as 0.5 when applying MIL-HDBK-217FN2
	Environment-al conditions	Operational condition of on-board control equipment with temperature control function Environmental condition is GB when applying MIL-HDBK-217FN2
	Life span determination conditions	No quantitative standard on the reliability and maintenance cost, etc. to abolish old type ATS on-board equipment.
Failure information	Accumulated operation hours	Introduced in 1982.02 - 1983.03(used for about 25 years without any improvement)
	Accumulated failure information	No failure information at the level of FRACAS application. No replacement case in accordance with the failure of components of old type ATS on-board equipment.

Table 1과 같이 구형ATS차상장치는 현재까지의 누적고장 정보 및 수명결정 기준이 없다. 누적고장정보는 실제 운영되는 구형ATS차상장치의 고장발생 현황을 분석하여 현재 및 미래에 대한 고장발생 유형을 고장확률밀도함수(PDF)와 잔존수명함수로 평가하기 위해 반드시 필요한 정보이다. 따라서 본 논문에서는 미국 신뢰성센터(RAC)가 발행한 217 Plus를 기준으로 전자제어기의 일반적 고장패턴으로 반영하여 구형ATS차상장치의 고장발생유형을 정의하였다.

전자부품으로 구성된 신호제어장치의 신뢰성은 MTBF와 MTBSF(Mean Time Between Service Failure)로 정량화

된다. MTBF는 장치의 수명 동안 고장이 발생하는 평균시간이며, MTBSF는 장치의 수명 동안 서비스고장이 발생하는 평균시간이다. 따라서 MTBF와 MTBSF의 차이는 고장 정의에 종속된다[4].

일반적으로 MTBF에서 고장은 장치에 기대된 기능의 상실로 고장을 정의하고 MTBSF에서 서비스고장은 고장영향으로 인한 열차 운행지연발생 유무를 기준으로 정의한다. 이러한 부품고장별 영향분석을 위해 MTBF와 MTBSF 관련 고장률을 분류하는 작업이 FMEA이다. 하지만 구형 ATS차상장치의 경우 부품단위 FMEA의 실시가 불가능(부품고장에 대한 FMEA보고서가 없고, 생산시기가 오래되어 설계에 참여한 인력의 인터뷰를 진행할 수 없음)하므로 구형ATS차상장치의 신뢰성은 보수적 데이터분석을 위해 MTBF를 수명평가의 기준으로 사용하였다.

MTBF는 고장률( $\lambda$ )의 역수인 MTTF(Mean Time To Failure)와 수리율( $\mu$ )의 역수인 MTTR(Mean Time To Repair)의 합으로 정의되지만, 일반적으로 10,000시간 이상인 MTTF를 기준으로 할 때 2시간 내외의 MTTR은 무시할 수 있는 수준이므로 MTBF를 고장률이 역수로 근사하여 사용한다. 전자부품의 고장률은 부품의 종류, 온도특성, 용량대비 사용정격, 출시연도 등의  $Pi(\pi)$ 팩터에 의해 영향을 받지만 IC, 저항 및 콘덴서 등의 부품들이  $10^{-8}/\text{hour}$ 에서  $10^{-6}/\text{hour}$ 의 부품단위 고장률을 가지므로, 이러한 부품의 조합으로 구성된 장치의 고장률은  $10^{-5}/\text{hour}$ , 즉 MTBF 10,000시간이 일반적인 전기전자프로그램머블 제어기의 신뢰도이다.

## 2.2 구형ATS차상장치 신뢰도예측

전자부품의 고장률변화에서 유아기와 노화기를 제외한 안정기에서는 고장률을 일정한 상수형태로 가정하여 시스템 MTBF를 계산한다. 따라서 안정기의 시스템을 사용하기 위해 시운전 및 Burn-In 시험 등을 통해 유아기 고장률을 제거하고, 누적고장정보를 관리하여 노화가 이전에 장치를 교체하는 것이 신뢰성기반 유지보수의 기본 개념이다[5].

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



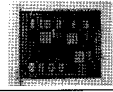








초기에 예측된 상수 고장률이 이론적으로 변하지 않는다고 가정하면 장치의 수명은 영원하다. 따라서 장치의 동작 중에 수집된 누적고장정보를 분석하여 고장률의 변화를 지속적으로 관리해야 한다. 하지만 그럼에도 불구하고 예측 고장률을 사용하는 이유는 장치의 수명주기 중 설계 및 제작과정에서는 실제 운영환경에서 수집된 고장정보를 확보할 수 없으므로, 신뢰도예측이 정량적으로 주어지는 신뢰

도목표의 만족여부를 평가하는 유일한 방법이기 때문이다.

또한 상수고장률 예측과정에 필요한 데이터인 부품종류, 용량, 품질, 부하, 온도특성 등을 충실히 입력하는 경우 실제 운영 환경에서 수집된 누적고장정보를 이용한 고장률과 거의 일치하므로 예측고장률은 오랜시간 운영을 통한 누적고장정보가 없는 장치의 신뢰도를 평가하기 위한 기준으로 사용할 수 있다.

구형ATS차상장치는 Table 2와 같이 총 11장의 PCB 및 하부장치로 구성되어 있으며, 하드웨어 여분이 없는 단일구조로 구성되어 있다. Table 2와 같이 구성된 구형 ATS차상장치의 MTBF를 예측하기 위해서는 구성요소단위 고장률을 예측하여 전체시스템의 고장률 및 MTBF를 예측해야 한다.

Table 2. LRU list of old type ATS onboard equipment

LRU	Picture of LRU	Quantity (EA)	LRU	Picture of LRU	Quantity (EA)
HSG		275	RCVR_S A-O		70
RCVR_O SC		65	SC_AMP -4M		11
RCVR_SA25		69	SC_COMP-9 B		91
RCVR_SA45		70	SC_PAT -34		42
RCVR_SA-F		70	SC-PC-9		81
RCVR_SA-M		71	Total		915

[Note] LRU : Line-side Replaceable Unit

Table 3. The equation of failure rate prediction on MIL-HDBK-217FN2

Relax S/W Class	MIL-HDBK equation
01.01	Logic, CGA or ASIC : $\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E)\pi_Q\pi_L$ $C_1$ = Die Complexity Failure Rate $\pi_T$ = Temperature Factor $C_2$ = Package Failure Rate $\pi_E$ = Environment Factor $\pi_Q$ = Quality Factor $\pi_L$ = Learning Factor
03.01	Resistor : $\lambda_p = \lambda_b\pi_T\pi_P\pi_S\pi_Q\pi_E$ $\lambda_b$ = Base Failure Rate $\pi_T$ = Temperature Factor $\pi_P$ = Power Factor $\pi_S$ = Power Stress Factor $\pi_Q$ = Quality Factor $\pi_E$ = Environment Factor



Fig. 3에서 세로축은 고장원인별 비율로써, 0과 1 사이의 값을 갖으며, 가로축은 시스템 고장에 대한 원인으로써, 모든 원인의 합은 1이다. 따라서 잔존수명함수를 적용하기 위해 Fig. 3의 고장원인별 형상모수(Shape Factor)를 Table 4와 같이 정리하였다[6].

확률밀도함수의 형상을 결정하는 형상모수는 고장원인별 비율과 마찬가지로 일반적 시스템의 고장패턴을 분석한 217 Puls의 데이터로써, 잔존수명함수에 누적고장정보를 분석하기 위한 Weibull 함수에 입력된다.

잔존수명의 수학적 정의는 신뢰도가 Zero 상태에 도달하기 직전까지를 생존으로 정의하여 식 (1)과 같이 신뢰도함수에 따라 잔존수명함수  $m(t)$ 를 표현한다.

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

식 (1)에서  $m(t)$ 는  $t$ 에서의 잔존수명이다. 즉, 현재시험  $t$ 까지 생존하고, 다음 임의의 시점까지 생존할 평균값이다. 이것을 다시 정리하면 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$m(t) = \frac{1}{R(t)} \left[ uR(u) \Big|_t^\infty - \int_t^\infty u dR(u) \right] \quad (2)$$

$$m(t) = \frac{1}{R(t)} \left[ \int_t^\infty u f(u) du \right] - t \quad (3)$$

식 (2)는 식 (1)의 적분항을  $d(f \cdot g) = df \cdot g + f \cdot dg$  법칙을 적용하여 유도하였으며, 식 (2)의 대괄호는  $uR(u) \Big|_t^\infty = 0 - tR(t)$ ,  $-dR(u) = f(u)$ 이므로, 식 (3)과 같이 유도하였다.

따라서 식 (3)를 구형ATS차상장치에 적용하기 위해서는 식 (3)의  $f(u)$ 를 217 Plus의 누적고장정보 분석결과를 반영하기 위해 식 (4)의 Weibull 함수형태로 변환해야 한다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left( - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 형상모수  $\beta$ 는 Table 4를 통해 217 Plus의 고장유형별 형상모수를 사용하며, 척도모수  $\eta$ 는 식 (5)와 같이 구형 ATS차상장치의 MTBF정보를 대입하여 Table 5와 같이 산출한다.

$$MTBF = \eta \Gamma \left( \frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (5)$$

Table 5의 고장원인별 Weibull함수는 식 (6)과 같이 구형 ATS차상장치의 Weibull함수로 표현이 가능하며, 식 (6)을 잔존수명함수 식 (3)에 대입하여 구형ATS차상장치 잔존수명함수를 식 (7)과 같이 정리하였다.

$$f_{ATS}(t) = \sum_{i=1}^8 p_i f_i(t) \quad (6)$$

$$m(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^8 p_i R_i(t)} \sum_{i=1}^8 \left( p_i \eta_i \Gamma \left[ \frac{1}{\beta_i} + 1, \left( \frac{t}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right] \right) - t \quad (7)$$

Table 5.  $\beta$ (shape factor) and  $\eta$ (scale factor) based 217Plus

No	Cause of Failure	$\beta$	$\eta$ (Hour)
1	Part Defect	1.62	250,373
2	Manufacturing Defect	0.96	220,191
3	Design	1.29	242,401
4	System Management	0.64	161,272
5	Wearout	1.68	251,100
6	No Defect	1.58	249,797
7	Induced	1.92	252,772
8	Software	0.7	177,141

구형ATS차상장치의 잔존수명함수 식 (7)에서  $p_i$ 는 Table 5의  $i$ 번째 고장 비율이며,  $\beta_i$ 와  $\eta_i$ 는 Table 5의  $i$ 번째 모수를 적용하면 시간  $t$ 에 따른 잔존수명이 산출된다.

식 (7)을 활용하여 구형ATS차상장치의 고장확률밀도함수와 고장률함수의 시간에 따른 변화를 표현하면 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

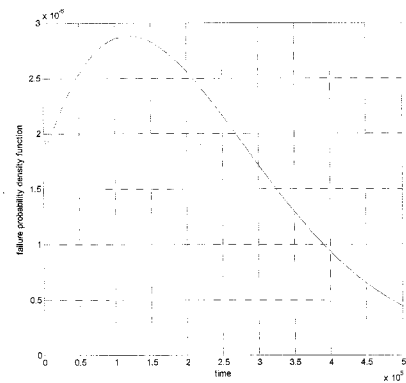


Fig. 4. PDF of ATS onboard equipment

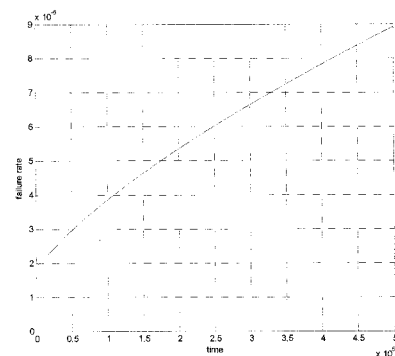


Fig. 5. Failure rate function of ATS onboard equipment

식 (7)에 구형ATS차상장치의 현재까지의 사용시간 219,000시간(25년)을 반영하면 신뢰도가 Zero가 될 때까지의 시간은 154,895시간(약 17.6년)임을 알 수 있으며, 또한 Fig. 5를 통해 고장률이 완만하게 증가함을 알 수 있다.

잔존수명평가의 결과를 정리하면 예측MTBF(피시험체의 약 63%가 고장 나는 시간)가 223,593시간(약 25.5년)인 구형 ATS차상장치는 예측신뢰도를 기준으로 현재 약 25년이 사용된 상태로 이미 교체시기에 도달하였으며, RAC의 217 Plus에서 제공하는 유사시스템의 고장유형을 기준으로 평가했을 때, 현재 시점에서 신뢰도가 Zero(주어진 시간에 기능을 정확히 수행할 확률이 0)가 될 때까지의 평균잔여 시간은 154,895시간(약 17.6년)으로 평가된다.

따라서 현재까지 구형ATS차상장치의 고장이 거의 발생하지 않았으며, Fig. 4와 Fig. 5의 추이분석을 통해, 향후 3년간 급격한 고장률 변화가 예상되지 않으므로 연장사용기간인 3년간은 무고장으로 운영이 가능하다고 추정된다.

이러한 추정을 검증하기 위해서 신뢰성시험을 통해 연장사용기간(3년)의 무고장 시험[7]을 실시하였다.

### 3. 노후신호장치 연장사용기간 무고장 입증

#### 3.1 무고장 입증

구형ATS차상장치는 MTBF예측치를 기준으로 이미 교체할 시기에 도달했으나, 유사시스템의 고장유형을 기준으로 잔존수명을 계산한 결과는 연장사용시간인 3년간은 고장이 급격하게 발생하지 않을 것이라는 결론에 도달했다. 따라서 향후 구형 ATS차상장치를 3년간 연장하여 사용하는 동안 무고장으로 장치가 동작할 지의 여부를 신뢰성시험을 통해 확인해야 한다. 전자부품 고장률에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 동작온도이다. Table 3의 부품종류별 고장률예측 방정식(MIL-HDBK-217FN2)에서도 부품의 종류에 관계없이 포함되는 것이 환경조건관련 Pi-Factor이다. 이러한 온도변화에 따른 MTBF 및 고장률의 변화를 이용하여 장치의 신뢰성을 가속하여 시험하는 방식이 가속스트레스시험이다.

가속스트레스시험은 부품별 온도스트레스에 종속되는 활성화에너지를 고려하여 가속계수를 선정한 후 가속된 시험시간동안 피시험체가 정상동작을 유지하면 시험시간에 가속계수를 고려한 만큼의 시간동안 정상동작을 보장하는 논리이다.

상온과 비교하여 피시험체가 가속스트레스시험 동안 노출되는 온도가 높을수록 가속계수가 커지지만 사용된 부품의 허용온도를 초과하게 되면 정상동작을 보증하는 범위를 벗어나므로 구형ATS차상장치의 신뢰성시험에서는 65°C의 시험환경을 선택하였다(일반적인 전자부품의 허용 온도는 70°C이다).

#### 3.2 무고장시험을 위한 가속계수 도출

구형ATS차상장치의 고장률을 65°C를 기준으로 예측하기 위해서는 식 (8)과 같이 가속계수(AF)를 산출해야 한다.

$$AF_{device} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{eA}{k} \right) \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (8)$$

eA: Activation energy(different by kind of parts)

k: Boltzmann constant(fixed constant  $8.623 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$T_n$ : Normal temperature+absolute temperature

$T_s$ : Accelerated temperature+absolute temperature

식 (8)을 적용하기 위한 구형ATS차상장치의 부품별 활성화에너지 및 가속계수를 계산하면 Table 6과 같다. Table 6의 활성화에너지는 Telcodia규격을 근거로 한다.

Table 6의 부품별 활성화에너지별 가속계수를 활용하여 구형ATS차상장치의 65°C 가속계수를 산출하기 위해선 식 (8)에 활성화에너지가 0.4 이상인(열화스트레스에 대한 의미가 있는 부품)부품을 대입하여 식 (9)와 같이 가속계수를 계산한다.

식 (9)를 통해 산출된 가속계수를 적용하여 시험시간을 연장사용시간 3년인 13,140시간으로 산출한다. 시험시간 13,140시간은 운영조건이 1일 12시간을 기준으로 하지만, 운영조건이 지속적으로 증가추세에 있고, 향후 3년 동안의 운영조건 변화를 예측하기 어려우므로, 신뢰성시험은 최대 가혹조건(Duration 1)을 반영하여 3년에 해당하는 26,280시간을 기준으로 실시하였다.

Table 6. Activation energy for electronic parts

Category	Quantity	Activation energy	AF(65°C)
Integrated Circuit	64	0.5	10.00121724
Semiconductor	154	0.5	10.00121724
Resistor	403	0.22	2.75437621
Capacitor	175	0.44	7.586588309
Inductor	24	0.15	1.995335173
Rotating Device	0	0	1
Relay	52	0.15	1.995335173
Switching Device	4	0.15	1.995335173
Connection	21	0.4	6.310187857
Miscellaneous	16	0.15	1.995335173
Other	2	0	1

$$AF = \frac{[(IC_n \times \lambda_{IC25} \times AF_{IC65}) + S(Semi_n \times \lambda_{semi25} \times AF_{semi65})]}{[(IC_n \times \lambda_{IC25})(Semi_n \times \lambda_{semi25})]} + \frac{[(\cap_n \times \lambda_{\cap 25} \times AF_{\cap 65}) + (Con_n \times \lambda_{con25} \times AF_{con65})]}{[(\cap_n \times \lambda_{\cap 25})(Con_n \times \lambda_{con25})]} \quad (9)$$

= 9.2199

따라서 식 (9)에 Table 6의 해당 정보와 고장률을 대입하면 가속계수 AF=9.2199가 산출된다.

### 3.3 구형ATS장치 연장사용기간 무고장 입증시험

신뢰성시험시간은 식 (10)과 같이 카이제곱공식을 적용하여 신뢰수준별로 산출한다. 신뢰성시험시간의 산출을 위해 식 (10)을 적용하는 것은, 통계에 의존하는 무고장시험의 특성상 신뢰수준에 따라 시험시간이 다르기 때문이다.

$$t = m_e \frac{\chi_{1-\alpha,2}^2}{2 \times n} \quad (10)$$

$t$  : Accelerated testing time based reliability level  
 $m_e$  : Target testing time  
 $\chi_{1-\alpha,2}^2$  : Value of statistic table(chi-square)  
 $2 \times n$  : Quantity of target(2 set)

식 (10)을 적용한 구형ATS차상장치의 신뢰수준별 시험시간은 Table 7과 같다.

Table 7. Accelerated testing time for target based reliability level

Reliability Level	Testing time(65°C)	
	Hour	Day
60%	1,306	55
70%	1,715	72
80%	2,287	96
90%	3,278	137

Table 7의 시험시간과 관련하여 전자부품으로 구성된 국내의 신뢰성시험의 사례를 조사한 결과 60-70% 수준을 일반적으로 사용하고 있으며, 이를 바탕으로 구형 ATS차상장치의 신뢰성시험의 신뢰수준도 70% 수준으로 결정[8]하였다.

구형ATS차상장치의 신뢰성시험(가속스트레스시험)은 2대의 피시험체(약25년간 운영된 장치)를 Fig. 6과 같이 대형온도챔버 및 정상동작상태 조성과 감시를 수행하는 시험지그를 사용하여 실시하였다. 신뢰성시험의 목적은 65°C 환경에서 1,715시간 동안 피시험체가 정상동작을 유지하는 것에 대한 확인으로써, 시험수행을 통해 연장사용기간 3년 동안 고장발생 없는 운영을 70% 범위 내에서 입증하였다.

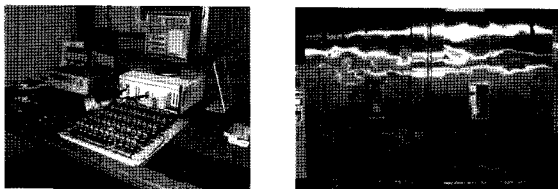


Fig. 6. Executing the reliability test by authorized agency for ATS onboard equipment

## 4. 결론

본 논문은 노후신호장치에 대한 잔존수명을 평가하고, 평가결과를 바탕으로 무고장 연장사용의 가능여부에 대한 평가모델을 개발하였다. 또한 개발된 모델을 약 25년 동안 운

영된 서울메트로 2호선 구형ATS차상장치에 적용하였다.

신뢰성정보가 존재하지 않는 구형ATS차상장치의 신뢰도를 MIL-HDBK-217FN2를 기준으로 1일 12시간 사용(Duration 0.5), 25°C, GB환경 조건에서 예측하였으며, 잔존수명을 계산하기 위해 필요한 장치의 누적정보는 RAC의 217 Plus의 유사장치 고장패턴을 적용하여 신뢰도 Zero까지의 남은 시간을 추정하여, 현시점에서 신뢰도 Zero까지의 고장밀도함수를 근거로 3년간의 무고장 연장사용이 가능한 것으로 평가하였다. 이러한 결론을 검증하기 위해 가속스트레스에 의한 신뢰성 시험을 실시하였다. 217 Plus의 고장패턴을 적용한 이유는 운영기간동안 발생한 고장정보의 체계적 관리가 이루어지지 않았기 때문이며, 유사 고장패턴 적용으로 인한 결과의 오차를 감소시키기 위해서는 하부구성요소단위 장치 고장정보의 수집 및 분석활동이 지속적으로 수행되어야 한다.

노후신호장치에 대한 잔존수명평가는 장치가 수명한계에 도달하기 이전에 개량 및 유지보수 계획수립을 가능하게 하며, 특히 장치고장이 열차의 대규모지연이나 사고와 밀접하게 관련된 철도신호분야에서는 과학적인 신뢰성관리에 의한 운영, 유지보수, 개량주기의 계획수립으로 인해 막대한 경제적 이익을 기대할 수 있다. 하지만 이러한 잔존수명평가에 의한 비용절감을 기대하기 위해서는 본 논문에서 강조한 바와 같이 운영되고 있는 장치의 신뢰도에 대한 지속적인 정보 수집과 분석의 필요성이 인식되고 준비되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 국토해양부(2009), “국토해양부령 제106호, 도시철도차량관리에 관한규칙”, 제9조, 제1항.
2. Jae-Hak Lim, Jai Sang Koh(1996), "On testing monotonically of mean residual life from randomly censored data", ETRI Journal, Vol.18, No.3. pp207-213.
3. 신덕호, 이재호, 이강미, 김용규(2006), “한국형고속철도 열차제어시스템 하부구성요소 신뢰도예측에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제4호, pp419-424.
4. Barry W. Johnson(1989), “Design and analysis of fault tolerant digital system,” Addison-wesley publishing company, pp. 170-184.
5. John Moubrey(1997), “RCMII, Reliability-centred maintenance,” Elsevier, pp. 6-7.
6. RiAC(2006), “Handbook of 217Plus, Reliability prediction models,” DoD, pp. 125-165.
7. 신덕호, 이재호, 이강미, 김용규(2006), “한국형고속철도 열차제어시스템 하부구성요소 신뢰도입증에 관한 연구,” 한국철도학회 논문집, 제9권, 제6호, pp. 732-738.
8. 한국전기연구원(2006), “2006부품소재 신뢰성향상사업 전기분야 기술위원회.”

접수일(2009년 4월 8일), 수정일(2009년 5월 11일),  
 게재확정일(2009년 8월 6일)