

## 한국형고속철도 열차제어시스템 하부구성요소 신뢰도예측에 관한 연구

### A Study on Reliability Prediction for Korea High Speed Train Control System

신덕호<sup>†</sup> · 이재호\* · 이강미\*\* · 김용규\*

Ducko SHIN · Jea-Ho LEE · Kang-Mi LEE · Young-Kyu KIM

#### Abstract

In this paper we study on a method to predict and to demonstrate the reliability of the Korea high speed train control system in quantitative point of view. For the prediction of the reliability in train control system which is composed of electronic parts, Relax Software 7.7 automation tool is employed and MIL-HDBK-217 Handbook that is a standard for the prediction of the failure rate in electronic components is used. Mean Time Between Failure (MTBF) is predicted based on the failure rate of the subsystems. State Modeling and Markov Modeling method is used to express a reliability function of the train control system composed by hardware redundancy as a function of time. We propose a Reliability Test which is performed on the level of the subsystems and Failure Report, Analysing, Correction action system which use the test operation data to prove the predicted reliability.

**Keywords** : Reliability(신뢰도), ATC(자동열차제어장치), Interlocking(연동장치)

## 1. 서론

한국형고속철도의 열차간격제어 및 진로제어를 수행하는 열차제어시스템은 2002년부터 건설교통부 주도로 시스템 안정화를 수행하고 있다. 안정화는 개발된 한국형고속철도 열차제어시스템을 고장이 없이 안전하게 운영할 수 있도록 시스템 개량과 동시에 국제 규격을 근거로 시스템의 신뢰성(Reliability), 가용성(Availability), 유지보수성(Maintainability) 및 안전성(Safety)의 문서화를 목적으로 한다[1].

본 논문에서는 핵심장치가 전기전자프로그램머블 제어기로 구성된 열차제어시스템의 신뢰도, 가용도, 유지보수도(RAM, Reliability, Availability, Maintainability)를 정량적으로 예측하고, 예측결과를 입증하기 위한 체계 중 시스템의 신뢰도 예측을 위한 체계를 제시하고, 제시된 체계에 따라서 자동열차제어장치(ATC, Automatic Train Control)와 전자연동장치(IXL, Interlocking)의 신뢰도 예측을 수행하였다. 열차제어시스템의 신뢰도 목표는 KTX 도입시에 제

공된 열차제어시스템(TCS, Train Control System)의 RAM 목표를 참조[2]하고, 안전관련 전기전자프로그램머블 제어기의 국제규격인 IEC 61508에서 제공하는 최고수준의 안전대책이 반영된 시스템의 평균고장확률을 근거로 하여 시스템을 구성하는 하부구성요소의 신뢰도 목표를 평균고장시간(MTBF, Mean Time Between Failure) 100,000시간으로 설정하였다[3].

열차제어시스템의 신뢰도는 시스템을 구성하는 부품의 고장률예측으로부터 출발한다[4]. 따라서 랜덤하게 발생하는 전자부품의 고장률을 정량적으로 예측하기 위해 본 논문에서 미국방성 전자부품고장률의 예측지침인 MIL-HDBK-217[5]을 사용하여 하부시스템단위 고장률을 정량화한다. 예측된 고장률을 토대로 MTBF 만족여부를 판단하고, 시스템 고장률증가의 주요원인을 분석하여 시스템 고장률을 감소시킨다. 또한 가용도는 시스템고장 특성을 지수고장모델로 모델링하여 신뢰도합수를 도출하고 시간에 따른 시스템의 신뢰도를 계산한다.

## 2. 열차제어시스템 신뢰도예측

### 2.1 신뢰도예측

핵심장치가 전자부품으로 구성된 열차제어시스템의 신뢰

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부 공학박사  
E-mail : ducko@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5442 FAX : (031)460-5443

\* 회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부 책임연구원 공학박사

\*\* 회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부 연구원

도는 하부시스템단위로 고장률을 예측하고, 다중계 특성을 고려한 하부시스템 연관관계를 분석하여 전체시스템의 신뢰도를 예측한다.

따라서 하부시스템의 고장률예측이 전체시스템 고장률예측에 기본이 되므로 하부시스템단위 고장률예측을 먼저 수행한다.

MIL-HDBK-217에서는 전자부품의 종류를 그림 1과 같이 분류하고, 고장형태에 따른 고장률예측 방정식을 제공하여, 방정식을 구성하는 Pi값에 사용된 부품의 특성 및 환경조건을 대입하여 부품단위 고장률을 예측한다. 본 논문에서는 하부시스템 고장률예측을 위해 자동화도구인 Relx7.7을 사용한다. Relx7.7은 식 (1)과 같은 메모리소자의 고장률방정식과 같이 하부시스템별 고장률수식을 사용부품관련 정보에 따라 계산하는 자동화 도구이며, 항공우주, 철도, 원자력 등에서 사용하는 MIL규격 외에도 가전에서 사용하는 Telcordia 또는 Bellcore기준을 적용할 수 있다. 또한, 시스템 사용온도 조건에 따른 고장률예측 등을 지원하여, 시스템 설계단계에서 고장률의 최소화를 위한 설계보완을 지원한다.

$$\lambda_p = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E + \lambda_{cyc}) \pi_Q \pi_L \quad (1)$$

표 1은 식(1)에 사용된 Pi값의 의미이다.

하부시스템 고장률예측을 위해서는 표 2와 같이 하부시스템 부품정보(BOM, Bill of Material)를 그림 2와 같이 자동화도구(Relx7.7)를 사용하여 하부시스템단위로 고장률과 MTBF를 예측한다.

표 1. 메모리의 고장률예측을 위한 입력변수

기호	입력변수의 의미
$C_1$	Die Complexity Failure Rate
$\pi_T$	Temperature Factor
$C_2$	Package Failure Rate
$\pi_E$	Environment Factor
$\lambda_{cyc}$	EEPROM Read/Write Cycling Induced Failure Rate
$\pi_Q$	Quality Factor
$\pi_L$	Learning Factor

표 2. ATC 연속수신보드에 사용된 IC의 예

Cat	Sub Cat	Part Num	Description	Qty	Ref	Man	Oper Pow (W)	Power Rat (W)	Case Temp (°C)
1	4	-	TMSP32032PCM A50	2	U10, U30	TI	0.3	1.95	31.0
1	6	-	AT290010A	2	U11, U31	ATMEL	0.15	0.27	32.0
1	5	-	K6R4016CID-JC 10	4	U12, U13, U32, U33	Samsung	0.5	0.2	29.0

\*Cat-부품의 대분류, Sub Cat-부품의 소분류, Part Num-부품의 개발단계명칭, Description-부품사양, Qty-수량, Ref-PCB상의 번호, Man-제조사, Oper Pow(동작전력), Power Rat-사용중 소모전력, Case Temp-동작중 표면온도

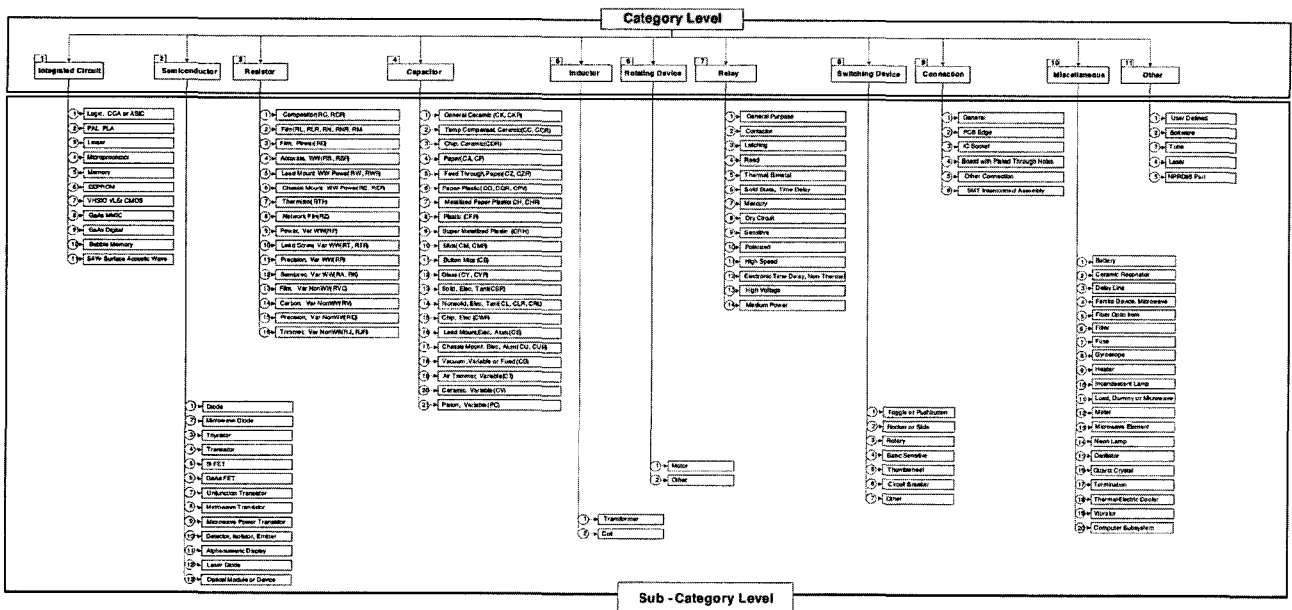


그림 1. 고장률예측을 위한 전자부품의 분류체계(Relx 7.7)

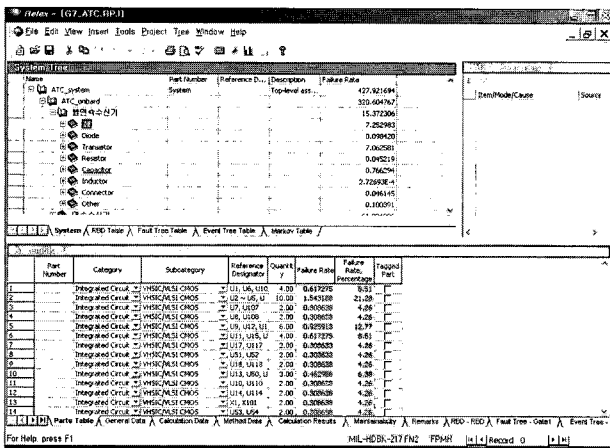


그림 2. 자동화도구를 사용한 고장률예측

따라서, 고장률의 예측을 위한 BOM의 작성은 설계자와 RAM엔지니어가 함께 작업을 수행해야 한다.

RAM엔지니어는 MIL-HDBK-217의 입력요건에 적합한 설계자의 BOM작성을 지원해야 하며, 작성된 BOM에 의한 하부시스템 또는 전체시스템의 고장률 예측치를 토대로 설계목표 만족을 위한 자문을 수행한다. 표 2는 열차제어시스템 고장률예측을 위해 RAM엔지니어가 설계자에게 양식을 제공하여 설계자가 작성한 BOM의 예이다.

### 2.2 ATC의 고장률 및 MTBF 예측

ATC 하부시스템단위 BOM을 바탕으로 고장률과 MTBF를 예측한 결과는 표 3과 같다. MTBF는 고장률의 역수인 평균고장수명(MTTF, Mean Time to Failure)과 평균복구시간(MTTR, Mean Time to Repair)의 합이다. 하지만 다중계 시스템으로 구성된 열차제어시스템의 고장검출 및 계절체를 통한 기능복구시간에 해당하는 MTTR이 MTTF에 비하여 매우 작은 시간이므로 MTBF를 고장률의 역수로 계산가능하다. 표 3의 결과와 같이 ATC 하부구성요소는 모두 목표신뢰도를 만족한다.

하부시스템단위로 예측된 고장률과 MTBF를 기반으로 ATC 지상장치 및 차상장치의 고장률과 MTBF를 계산한 결과를 표 4에 제시하였다.

ATC는 제어기 내부에서 발생한 결함을 실시간으로 검출하는 자기검사알고리즘을 내장하고 있다. 따라서, 단일계에서 결함이 발생하면 결함이 발생한 단일계의 출력을 차단하고 대기계가 제어를 수행하는 능동형여분구조 중 대기이중계구조(Hot-Standby Spring)로 설계하였다. 또한 대기계는 동작계가 정상일 경우 출력을 발생하지 않지만 연산을 동작계와 동일하게 수행하고 있으므로, 이중계구조 시스템의 동

표 3. ATC의 하부시스템별 고장률과 MTBF

분류	순번	구성요소	단위시간당 고장률 (10 <sup>-6</sup> )	MTBF (Hour)
차상장치	1	연속수신보드	4.829086	207,079
	2	불연속수신보드	7.336311	136,308
	3	디지털입력보드	7.067186	141,499
	4	디지털출력보드	9.335712	107,116
	5	CPU보드	5.29096	190,509
지상장치	6	운영자콘솔	9.259259	108,000
	7	지상제어모듈	3.978634	251,343
	8	지상연속수신보드	3.872544	258,228
	9	지상불연속수신기	3.566469	280,389

표 4. ATC 단일계 구성 고장률과 MTBF

구성요소	단위시간당 고장률 (10 <sup>-6</sup> )	MTBF (Hour)	MKBF (km)
차상장치 (단일시스템) (표 3의 1+2+3+4+5)	33.8593	29,534	128.630
지상장치 (단일시스템) (표 3의 7+8+9)	11.4176	87,584	-

\*MKBF(Mean Kilometer Between Failure)는 단일계수량 4개, 연간 운행일수 365일, 1일 운행시간 7.5h, 1회 435km기준

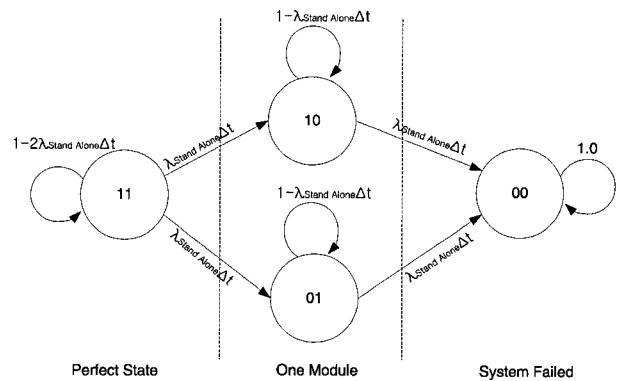


그림 3. Hot-Standby Sparing 구조 ATC의 상태모델

작특성을 상태다이어그램으로 모델링하면 그림 3과 같다.

그림 3과 같이 시스템의 상태를 결함이 발생할 수 있는 임의시간  $\Delta t$ 에 따라 마코브모델을 사용하여 시간에 종속된 시스템신뢰도를 계산한다. 따라서 ATC 지상 및 차상장치의 신뢰도는 지수고장특성으로 모델링하면 식 (2)와 같이 도출된다.

$$R_{ATC}(t) = 2e^{-\lambda_{Stand Alone} t} - e^{-2\lambda_{Stand Alone} t} \quad (2)$$

표 5. ATC장치의 시간에 따른 신뢰도

시스템 운영시간 (Hour)	시스템 신뢰도(%)	
	차상장치	지상장치
10,000	91.77	98.84
20,000	75.84	95.83
30,000	58.37	91.59
40,000	45.02	86.56
50,000	33.47	81.08
60,000	24.56	75.40
70,000	17.87	69.71
80,000	12.92	64.14
90,000	9.31	58.77
100,000	6.68	53.66

식 (2)에서  $\lambda_{\text{and Alone}}$  은 단일모듈의 고장률이며,  $t$ 는 시간이다. 따라서, 식 (2)에 의해 시간에 따른 ATC의 신뢰도를 계산하면 표 5와 같다.

### 2.3 전자연동장치의 고장률 및 MTBF예측

IXL의 하부시스템단위로 제공된 BOM을 바탕으로 고장률과 MTBF를 예측한 결과는 표 6과 같다.

표 6과 같이 하부시스템단위로 예측된 고장률과 MTBF를 기반으로 IXL의 단일계구성 고장률과 MTBF를 계산한 결과를 표 7에 제시한다. IXL 하부구성요소의 MTBF도 ATC의 하부구성요소와 같이 목표신뢰도를 만족한다.

IXL의 연동논리부는 제어기 내부에서 발생된 결함을 실시간으로 검출하는 자기검사회로를 내장하고 있으며, 단일계에서 결함이 발생하면 결함이 발생된 단일계의 출력을 차단하고 대기계가 제어를 수행하는 능동형여분구조 중 대기이중계 구조로 설계하였다. 따라서 ATC와 동일한 신뢰도 모델을 사용하여 표 8과 같이 시간에 따른 신뢰도를 산출하였다.

IXL 현장제어모듈인 TFM\_IM, TFM\_OM, TFM\_PM, TFM\_SM의 이중계 구조는 동기방식으로 동작하는 이중계 데이터를 비교기를 사용하여 결함에 따른 데이터의 불일치로 결함을 검출한다.

따라서, 비교기에서 불일치가 발생하면 불일치가 발생된 모듈은 차단되며, 대기이중계로 구성된 다른 이중계 구조가 동작을 연속적으로 수행하는 듀얼듀플렉스(Dual-Duplex)구조로 구성되어 있다.

따라서 듀얼듀플렉스구조 현장제어모듈의 상태다이어그램은 그림 4와 같다.

그림 4의 현장제어모듈 상태모델을 마코브모델을 통하여 간소화하여 듀얼듀플렉스구조의 신뢰도함수를 구하면 식

표 6. IXL 하부시스템별 고장률과 MTBF

순번	구성요소	단위시간당 고장률 ( $10^{-6}$ )	MTBF (Hour)
1	연동논리부 CPU보드	1.119474	898,277
2	연동논리부 통신보드	0.747764	1,337,320
3	현장제어부 입력모듈	3.969599	251,915
4	현장제어부 출력모듈	4.47694	223,374
5	현장제어부 선로전환기모듈	6.082854	164,397
6	현장제어부 신호기제어모듈	6.555135	152,553

표 7. IXL 단일계구성 고장률과 MTBF

순번	구성요소	단위시간당 고장률 ( $10^{-6}$ )	MTBF (Hour)
1	단일계 연동논리부	1.8672	535,550
2	현장제어부 입력모듈	1.9848	503,830
3	현장제어부 출력모듈	2.2384	446,750
4	현장제어부 선로전환기모듈	3.0414	328,790
5	현장제어부 신호기제어모듈	3.2276	305,100

표 8. IXL 연동논리부의 시간에 따른 신뢰도

시스템 운영시간 (Hour)	시스템 신뢰도(%)
	전자연동장치 연동논리부
10,000	99.99
20,000	99.87
30,000	99.70
40,000	99.48
50,000	99.21
60,000	98.88
70,000	98.50
80,000	98.70
90,000	97.61
100,000	97.10

(3)과 같다.

$$R_{TFM}(t) = \frac{2}{3}e^{-\lambda_{\text{and Alone}} t} + 2e^{-3\lambda_{\text{and Alone}} t} - \frac{5}{3}e^{-4\lambda_{\text{and Alone}} t} \quad (3)$$

IXL 현장제어모듈의 신뢰도함수 식 (3)에 따라 시간에 따른 현장제어모듈의 신뢰도를 구하면 표 9와 같다.

이상과 같이 한국형고속철도 열차제어시스템의 신뢰도요구사항인 MTBF 100,000시간을 ATC와 IXL의 하부구성요소가 모두 만족함을 MIL-HDBK-217을 통한 예측하였다.

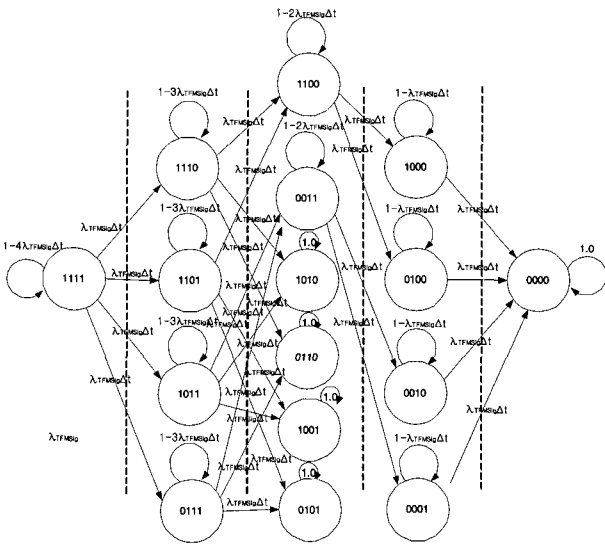


그림 4. 듀얼듀플렉스구조 IXL 현장제어모듈의 상태모델

표 9. IXL 현장제어모듈의 시간에 따른 신뢰도

시스템 운영시간 (Hour)	시스템 신뢰도(%)			
	입력모듈	출력모듈	선로전환기 제어모듈	신호기 제어모듈
10,000	99.85	99.81	99.65	99.61
20,000	99.42	99.27	98.70	98.55
30,000	98.75	98.44	97.26	96.95
40,000	97.87	97.35	95.42	94.93
50,000	96.81	96.05	93.28	92.58
60,000	95.59	94.57	90.91	89.99
70,000	94.24	92.94	88.36	87.22
80,000	92.78	91.18	85.68	84.34
90,000	91.22	89.33	82.92	81.38
100,000	89.58	87.41	80.12	78.39

### 3. 신뢰도예측치의 입증

열차제어시스템의 예측신뢰도는 철도신호시스템 RAMS규격인 IEC62278에서 제시하는 바와 같이 예측치의 입증이 수행되어야 한다. 따라서 신뢰도의 입증은 시운전기간동안 발생된 열차제어장치의 고장정보를 분석하여 고장보고분석 및 정정활동시스템인 FRACAS(Failure Reporting, Analysing, Correction Action System)[6]를 그림 5와 같이 미국방성 규격 MIL-STD-785B를 기준으로 수행하고 있다.

시운전을 통한 신뢰도의 입증은 데이터수집 범위인 소요시간과 주행거리에 따라 산출된 시스템 신뢰도의 신뢰수준이 결정된다. 따라서, 열차제어시스템 중 ATC 차상장치를 제외한 장치들은 FRACAS를 수행하여 시스템의 신뢰도를

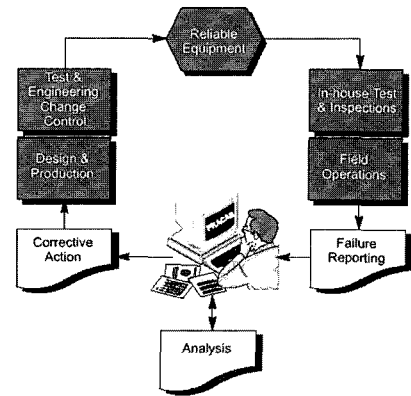


그림 5. FRACAS의 절차

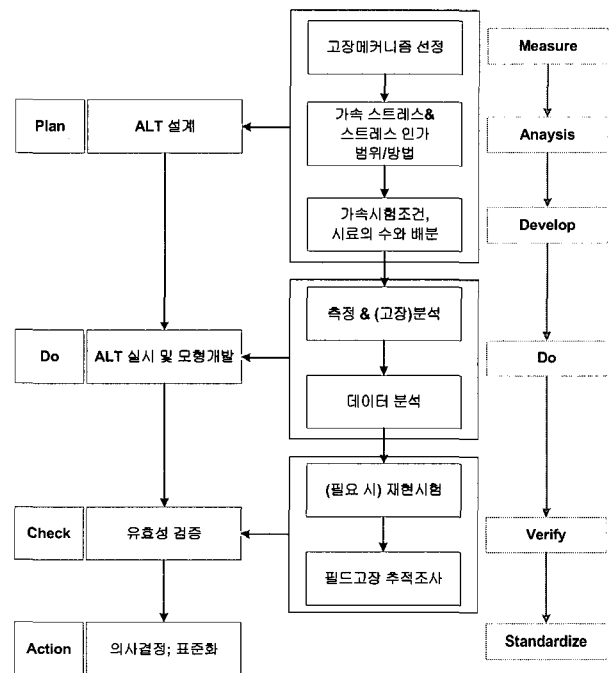


그림 6. 가속시험 실시절차

입증하기 위한 충분한 시운전데이터가 확보되지 않았다. 즉, ATC 지상장치는 오송기지 내에서 실시한 3개월간(24시간 가동)의 시운전 데이터가 확보되어 있으며, IXL은 청령포역에서 실시한 9개월(24시간 가동)의 영업운전실적이 확보되었으나, 예측신뢰도의 입증을 위해서는 보다 오랜 기간의 시운전데이터가 확보되어야 한다.

또한 현장시험추진과 병행하여 시스템에 스트레스요인을 가속하여 신뢰도를 입증하는 신뢰성시험을 통해 하부구성요소 단위의 MTBF를 그림 6과 같은 절차로 추진하여 신뢰도를 입증하고 있다. 신뢰성시험은 시제품의 수명한계에 대한 가속수명시험 보다는 열화스트레스를 사용하여 목표신뢰성의 확보를 확인하는 비파괴방식으로 시험을 추진하고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 미국방성 전자부품고장률예측지침인 MIL-HDBK-217을 기준으로 전자부품으로 핵심장치가 구성된 열차제어 시스템의 고장률을 정량적으로 예측하였으며, 다중계구조에 따라 신뢰도모델링을 통해 시스템수명에 따른 신뢰도를 예측하였다. 또한 예측된 열차제어시스템 신뢰도의 입증을 위한 방안으로 시운전 중 발생된 고장데이터를 사용하는 FRACS와 시운전이 용이하지 않은 시제품의 신뢰도입증을 위한 신뢰성시험에 대하여 연구가 진행중이다. FRACAS와 관련해서는 발생된 고장정보에 의한 시스템 신뢰도를 평가하는 고장검토위원회(FRB, Failure Review Board)에 대한 구성을 중심으로 추진하고 있으며, 신뢰성시험은 적용스트레스 및 시스템모델링을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

향후에는 한국형고속철도 열차제어시스템의 시스템 의존도(Dependability)를 구성하는 다른 요소들인, 가용도, 유지보수도, 안전성, 성능성(Performability), 시험용이성(Testability)

등에 대한 예측과 입증을 위한 정량화된 체계의 개발과 수행방안에 대한 연구가 지속되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원 (2005), “고속철도기술개발사업 고속철도 열차제어시스템 안정화기술개발 단계평가보고서”, 서론.
2. KHRC&KTGVC (1994), “SEOUL-PUSAN High Speed Rail Project CONTRACT”, Exhibit “D”, Rolling Stock, pp.33.
3. IEC61508 (1998), “Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (Part1, General requirements)”, pp.65.
4. Barry W. Johnson (1989), “Design and analysis of fault-tolerant digital systems”, pp.170-175.
5. Relx7.7 (2005), “MIL-HDBK-217 Equation References”.
6. MIL-STD-785B (1980), “Reliability Program for System and Equipment Development and Production”.