

# 열차제어시스템 가속 스트레스시험 모델링에 관한 연구

## A Study on Train Control System Accelerated Stress Modeling

이강미\*      신덕호\*\*      이재호\*\*  
Kang-mi Lee   Ducko Shin   Jae-ho Lee

---

### ABSTRACT

This paper studies a modeling to demonstrate predicted reliability of the train control system components by performing an accelerated stress test. There are two tests for demonstrating predicted reliability; test run at the whole system level, and accelerated life test and accelerated stress test at the component level. In this paper, we imposed accelerated stress on the system and studied the train control system modeling for the accelerated stress test, which demonstrates predicted reliability according to whether or not the equipment is operating. Reliability of train control system consisting of electronic components varies drastically according to temperature so we considered the Arrhenius equation and the activation energy of electronic components. We also used reliability modeling with weighted average and calculated time necessary to complete the accelerated stress test on train control system.

---

### (국문요약)

본 논문은 열차제어시스템의 하부구성요소단위 예측신뢰도를 가속스트레스시험을 통해 입증하기 위한 모델링을 연구한다. 예측신뢰도의 입증을 위해서는 전체시스템단위 시운전과 하부구성요소단위 가속수명시험 및 가속스트레스 시험을 통한 방법이 있으며, 본 논문에서는 하부구성요소단위로 정해진 시간동안 가속된 스트레스를 주입하여 장치의 생존여부에 따라 예측신뢰도를 입증하는 가속스트레스 시험을 위한 열차제어시스템의 모델링을 연구하였다.

전자부품으로 구성된 열차제어시스템은 사용온도에 따라 신뢰도가 급격하게 변화한다는 점에 착안하여 아레니우스 방정식 및 전자부품 활성화에너지를 고려하였으며, 가중평균을 사용한 신뢰성시험 모델링을 제시하여 열차제어시스템 가속스트레스시험의 시험시간을 산출하였다.

---

\* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부

E-mail : kmlee246@krri.re.kr

TEL : (031)460-5433 FAX : (031)460-5449

\*\* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부

## 1. 서론

제어기술의 발달과 국내 IT기술의 선진적 자리매김에 따라 열차제어분야에서도 활발한 국산화가 진행되고 있다. 이러한 시대적 변화에 의해 국내 열차제어분야 신규사업뿐만 아니라 국외 신규사업에도 본 연구결과인 한국형고속철도 열차제어시스템의 실용화를 위해 노력하고 있다. 하지만, 국외의 경우 시스템 기능과 더불어 시스템의 신뢰성, 가용성, 유지보수성, 안전성에 대한 국제규격 또는 자국의 규격에 따른 수명관리를 대부분 전제로 하고 있으며, 이러한 신뢰성수명관리의 입증자료로서 정량적인 평가데이터를 요구하고 있다. 또한, 국내에서는 2004년 철도안전법의 발효에 의해 신규설치물의 경우 시설관리자 또는 운영자의 안전확인을 법으로 정하고 있어서 국내도 국외시장과 환경과 유사하게 변화하고 있다.

따라서, 본 연구에서 구축되고 있는 열차제어시스템에 대해서도 현재까지의 신뢰성 및 안전성에 대한 연구 외에도 시스템 유지보수도와 신뢰도의 정량적 평가를 기반으로 하는 유지보수체계의 수립이 시급히 요구되고 있다.

## 2. 본론

본 연구는 G7사업에서 시제품으로 개발된 자동열차제어장치와 전자연동장치의 상용화를 위한 안정화 연구이다. 자동열차제어장치는 역과 역 사이를 운행하는 열차의 제한속도초과를 감시하고 지리적 정보를 수집하여 열차의 안전한 운행을 지원하는 장치이며, 전자연동장치는 역구내에서 궤도회로를 통해 추적된 열차의 위치를 바탕으로 신호기와 선로전환기를 제어하여 열차의 진로를 제어하는 장치이다.

본 연구에서는 이러한 열차제어시스템 기술을 확보하였으며, 기술확보의 입증을 위해 자동열차제어장치의 경우 현재 운영중인 고속선에서 차상장치를 시험하였으며, 전자연동장치의 경우 태백선 청령포역에서 영업선에 대한 서비스를 제공하는 시운전을 수행하였다. 이러한 열차제어시스템 기술의 확보는 향후 추진되는 신규철도망의 건설이나 기존 고속선 및 일반선의 개량 또는 유지보수시에 국내기술로 개발된 시스템의 공급이 가능하게 하였으며, 본 연구성과의 일부 실용화 사례에서 알 수 있듯이 외국 시스템과의 경쟁력도 상당부분 확보된 상태이다.

열차제어시스템에서 고장이 발생하는 경우 서비스제공의 중단으로 인해 대규모 운행지연이 발생할 수 있으므로, 열차제어시스템의 고장을 분석하여 발생빈도를 최소화하고 발생한 고장에 대해서는 기능복귀 시간을 최소화 하는 것이 매우 중요하다.

자동열차제어장치와 전자연동장치의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구는 각각의 장치를 결함허용구조로 설계하여 단일고장에 대하여 시스템기능상실이 발생하는 것을 최소화 하였으며, 정량적으로는 하부구성요소단위 평균고장시간(MTBF)를 100,000시간 이상 확보하도록 개발수명주기 전반을 관리하였다. 이러한 관리를 위해 열차제어시스템을 구성하는 장치를 부품단위로 미국방규격에 의해 고장률을 예측하여 목표신뢰도와 비교하였으며, MTBF예측치의 비교결과를 분석하여 설계를 보완하였다. 또한, 예측치와 실제 제작된 장치의 실제 고장률오차를 최소화하기 위해 하부구성요소단위 신뢰성시험을 통한 MTBF의 입증을 수행하였다. 열차제어시스템 신뢰성확보를 위한 일련의 절차는 높은 신뢰성을 요구하는 유사 응용분야인 원자력, 항공, 군수, 화학플랜트, 금융 등의 제어분야에 적용이 가능하다.

### 2.1 신뢰도예측

신뢰도의 예측은 기 설정된 신뢰도 목표인 하부구성요소별 MTBF 100,000시간을 만족하도록 부품단위 고장률분석을 근거로 시스템의 고장률을 예측하는 과정으로써, 연차별로 수행되는 설계보완사항을 반영하여 지속적으로 요구사항에 대한 만족여부를 확인한다.

시스템의 신뢰도 목표인 MTBF 100,000시간을 분석해 보면, MTBF는 평균고장수명(MTTF)과 평균수리시간(MTTR)의 합으로써, MTTF는 고장률의 역수이므로 MTTR은 MTTF에 비해 무시할 수 있는 수준의 작은 값이라고 가정할 때, MTBF는 MTTF와 동일한 함수로 사용할 수 있다. 따라서 MTBF는

열차제어시스템 하부구성요소 각각의 고장률이 1E-6이하로 억제되어야 함을 의미한다.

전자부품으로 구성된 열차제어시스템인 자동열차제어장치와 전자연동장치는 그림 1과 같은 신뢰성관리 흐름에 따라 예측과 입증의 연차별로 반복 수행된다.

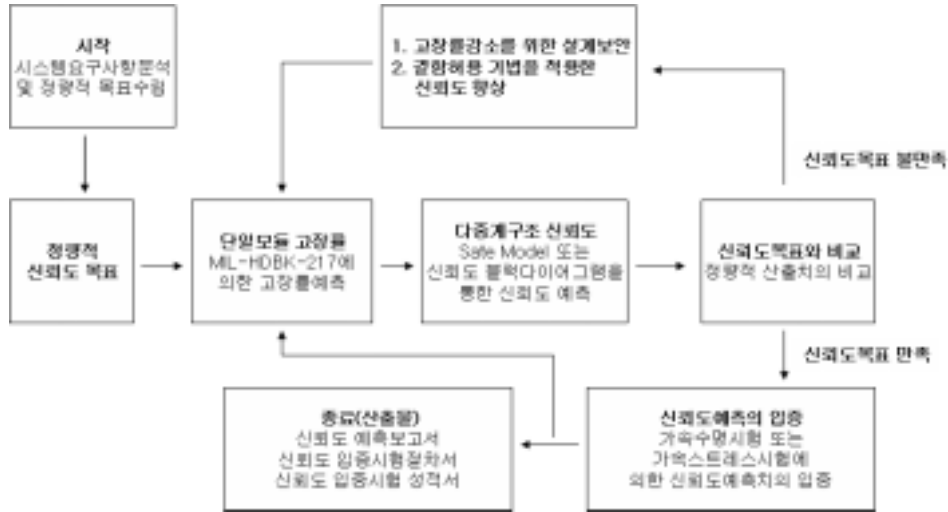


그림 1. 열차제어시스템 신뢰성관리 흐름도

전자부품의 고장은 랜덤하게 발생하므로 확률 및 통계적 접근방식에 따라 신뢰도를 예측하고 입증한다. 본 연구에서는 전자부품으로 구성된 제어시스템의 신뢰도를 부품의 고장빈도에 대한 분석을 통해 함수형태로 제시하여, 부품의 종류, 사용환경, 제작사 등의 정보에 따라 고장률을 상수화 시키는 미국방규격인 MIL-HDBK-217FN2를 기준으로 산출하였다.

표 1. 자동열차제어장치의 하부구성요소 고장률예측결과(25℃기준)

분류	표기	구성요소	3차년도 MTBF(Hour)	4차년도 MTBF(Hour)
차상장치	CIB	연속수신보드	207,079	131,866
	FIB	불연속수신보드	136,308	115,435
	DI	디지털입력보드	141,499	121,617
	DO	디지털출력보드	107,116	107,908
지상장치	TDSP	지상제어보드	251,343	255,814
	TXG_AMP	연속송신보드	258,228	229,202
	TXL_AMP	불연속송신보드	280,389	227,972

표 2. 전자연동장치의 하부구성요소 고장률예측결과(25℃기준)

분류	표기	구성요소	3차년도 MTBF(Hour)	4차년도 MTBF(Hour)
연동논리부 (IXL)	IXL_CPU	CPU모듈	898,277	219,623
	IXL_SCC	시리얼인터페이스모듈	1,337,320	261,730
현장제어부 (TFM)	IM	입력모듈	251,915	313,762
	OM	출력모듈	223,374	216,677
	PM	선로전환기 제어모듈	164,397	131,202
	SM	신호기 제어모듈	152,553	160,262

## 2.2 신뢰도 입증

시작품 수명의 입증방법 중 가속시험은 시작품이 동작하는 동안 작용하는 스트레스 요인 중 장치의 수명에 가장 영향이 큰 요소들을 선택하여 실제운영환경과의 가속계수를 도출하고, 가속계수에 의해 시험시간을 단축시키는 방법이다.

열차제어시스템을 구성하는 전자부품은 그림 2와 같이 온도에 가장 민감하게 수명이 좌우된다는 것을 관련 논문 및 문헌을 통해 확인하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 따라서, 온도스트레스를 열차제어시스템 신뢰성시험의 스트레스요인으로 선정하기 이전에 위 그림과 같이 자동열차제어장치와 전자연동장치의 하부구성요소별 온도에 따른 MTBF의 변화 추이를 미국방 지침 MIL-HDBK-217FN2를 근거로 추정하였다.

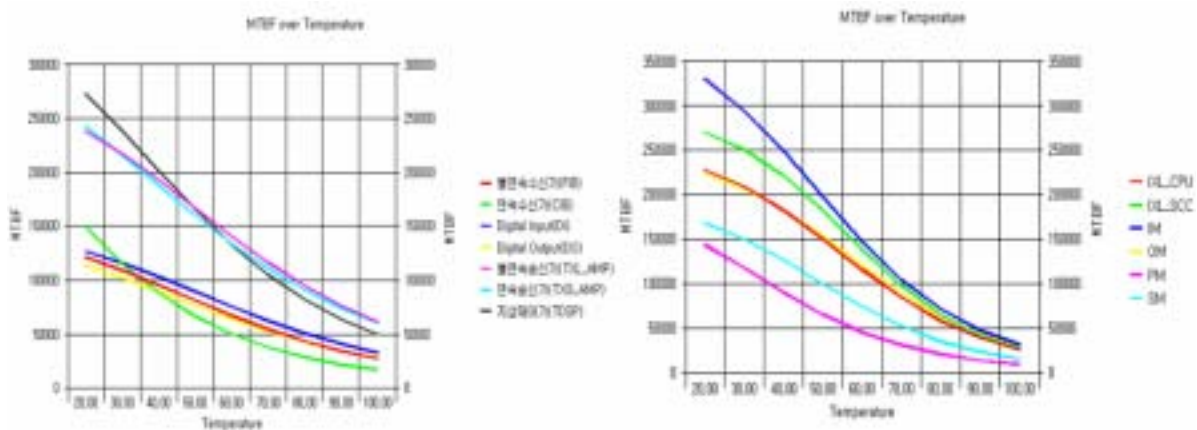


그림 2. 열차제어시스템 하부구성요소의 온도에 따른 MTBF

따라서, 열차제어시스템 신뢰성시험은 온도스트레스에 대하여 시스템에 사용된 부품의 설계마진인 70°C이하를 고려하여 신뢰성시험을 그림 3과 같은 절차를 수립하여 수행하였다.

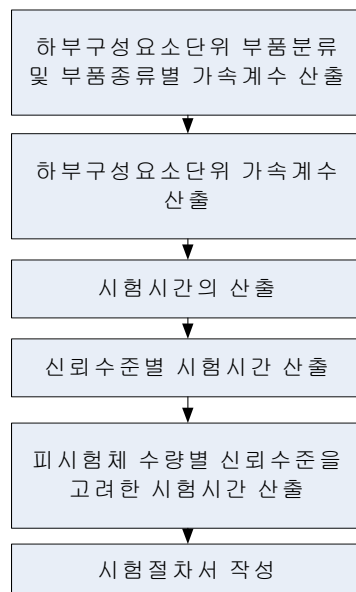


그림 3. 신뢰성시험 모델링 절차

온도스트레스를 이용한 열차제어시스템 신뢰성시험을 위해서는 시료의 수, 시험기간, 시험결과의 유효수준에 대한 분석이 선행되어야 한다.

신뢰성시험 모델링 절차에 따라 열차제어시스템을 구성하는 자동열차제어장치와 전자연동장치의 하부 구성요소단위 시험시간이 시험결과의 유효수준 및 시료 수를 기준으로 다음과 같이 산출되었다.

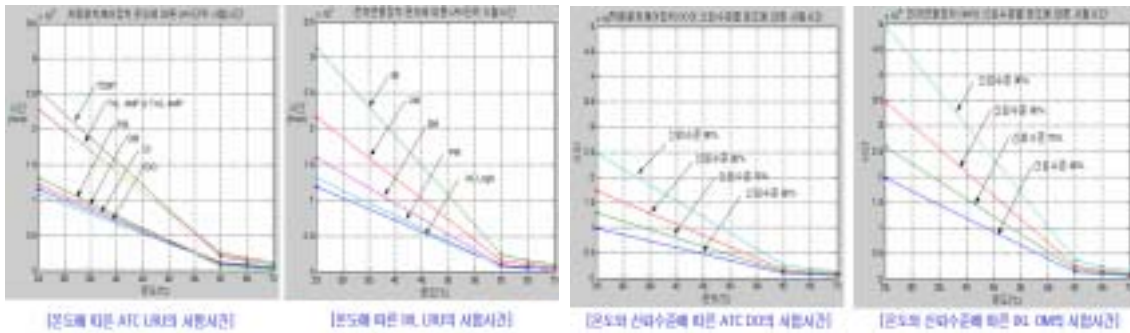


그림 4. 신뢰성시험 시간과 유효수준에 따른 시험시간 산출

표 3. 자동열차제어장치 하부구성요소의 신뢰성시험 산출표

분류	하부구성 요소	유효 수준	가속시험시간 Hour(Day)							
			25℃		60℃		65℃		70℃	
			n=2	n=4	n=2	n=4	n=2	n=4	n=2	n=4
차상 장치	FIB	60%	52,886 (2,204)	26,443 (1,102)	4,529 (189)	2,265 (94)	3,206 (134)	1,603 (67)	2274 (95)	1,137 (48)
	CIB	60%	60,414 (2,517)	30,207 (1,259)	3,025 (126)	1,512 (63)	2,035 (85)	1,018 (43)	1381 (58)	691 (29)
	DI	60%	55,718 (2,322)	27,859 (1,161)	5,426 (226)	2,713 (113)	3,888 (162)	1,944 (81)	2789 (116)	1,394 (58)
	DO	60%	49,438 (2,060)	24,719 (1,030)	4,988 (208)	2,494 (104)	3,616 (151)	1,808 (75)	2627 (110)	1,313 (55)
지상 장치	TXL_AMP	60%	104,444 (4,352)	52,222 (2,176)	11,366 (474)	5,683 (237)	8,263 (345)	4,131 (172)	6012 (251)	3,006 (125)
	TXG_AMP	60%	105,008 (4,376)	52,504 (2,188)	10,846 (452)	5,423 (226)	7,914 (330)	3,957 (165)	5792 (242)	2,896 (121)
	TDSP	60%	117,200 (4,884)	58,600 (2,442)	9,319 (389)	4,659 (194)	6,529 (272)	3,265 (136)	4,589 (191)	2,295 (96)

표 4. 전자연동장치 하부구성요소의 신뢰성시험 산출표

분류	하부구성 요소	유효 수준	가속시험시간 (Hour/Day)							
			25℃		60℃		65℃		70℃	
			n=2	n=4	n=2	n=4	n=2	n=4	n=2	n=4
연동 논리부	연동 처리 모듈	60%	54,711 (2,280)	27,356 (1,140)	3,785 (158)	1,892 (79)	2,499 (104)	1,249 (52)	1,637 (68)	819 (34)
현장 제어모 들	입력 모듈 (IM)	60%	143,749 (5,990)	71,874 (2,995)	10,788 (450)	5,394 (225)	7,176 (299)	3,588 (150)	4,748 (198)	2,374 (99)
	출력 모듈 (OM)	60%	99,270 (4,136)	49,635 (2,068)	7,283 (304)	3,641 (152)	4,890 (204)	2,445 (102)	3,265 (136)	1,632 (68)
	선로전환기 제어모듈 (PM)	60%	60,110 (2,505)	30,055 (1,252)	3,442 (144)	1,721 (72)	2,256 (94)	1,128 (47)	1,482 (62)	741 (31)
	신호기 제어모듈 (SM)	60%	73,423 (3,060)	36,712 (1,530)	4,551 (190)	2,276 (95)	2,977 (124)	1,488 (62)	1,940 (81)	970 (41)

온도스트레스에 대한 신뢰성시험 모델을 공인기관에서 수행하기 위해 그림 5와 같이 신뢰성시험 절차서를 작성하였다. 신뢰성시험 절차서는 열차제어시스템을 구성하는 자동열차제어장치와 전자연동장치의 하부구성요소 단위로 입출력의 기술사양을 제시하고, 제작사에서 시험시 정상동작을 입증하기 위한 시험지그의 구성 및 고장의 판단기준을 제시하였다.



그림 5. 신뢰성시험 절차서, 자동열차제어장치 DI 및 전자연동장치 OM

### 2.3 전문기관 신뢰성시험



그림 6. 공인기관 온도 시험기 및 자체제작 지그를 이용한 신뢰성 시험 실시



그림 7. 공인시험기관 온도시험기 및 자체제작 지그를 사용하여 신뢰성시험 실시

### 3. 결 론

열차제어시스템 안정화 기술은 전자부품으로 구성된 제어기를 사용하여 높은 신뢰도가 요구되는 제어를 수행하는 원자력, 항공, 화학플랜트 등의 분야에 대하여 개발수명주기별로 신뢰도를 정량적으로 관리하는데 활용할 수 있다. 또한, 하부구성요소단위 신뢰성시험을 통합 예측신뢰도의 입증방법으로 열차제어분야 기존설비의 잔존수명평가를 수행하면, 장치별 내구연안 할당의 적정성, 사용 중인 시스템의 현재 신뢰도를 평가하여 운영 및 유지보수의 효율성을 극대화 할 수 있다.

개발이 완료된 열차제어시스템은 표준화를 통해 시험·평가한 후 실용화를 목표로 하여, 개발된 시스템이 적용된 고속 전철 및 일반 전철은 내수 시장과 수출 시장에 진출하여 경쟁력을 높일 수 있도록 한다. 본 연구는 기술개발의 초기단계부터 산·학·연이 공동으로 참여하였으며, 개발 후에도 협력 업체로 기술을 전수하는 방법을 채택하기 때문에 기업군별 기술 보호와 기술 파급이라는 두 가지 목적을 동시에 획득할 수 있다. 자동열차제어장치의 실용화 방안은 두 단계로 나눌 수 있으며, 1단계에서는 국내외 일반철도와 도시철도는 물론 향후 건설되는 고속철도를 활용대상으로 하고 있다. 2단계에서는 높은 신뢰도를 갖는 자동열차제어장치의 핵심기술인 결합허용 설계기법을 철도분야 뿐만 아니라 항공, 원자력 등의 안전필수 응용분야의 핵심부분에 진출하고자 한다.