

표준전동차 실용화를 위한 내구도 시험

An Endurance Test for the Commercial Operation of the Korean EMU

정 종덕* 김 원경** 한 석윤** 이 관섭***

Chung, Jong-Duk Kim, won-kyung Han, Seok-Youn Lee, Kwan-Sup

ABSTRACT

This paper describes the result of endurance test on the Sangju test track. The purpose of the test is to prove the endurance of the Korean EMU for the commercial operation. Test conditions are more severe than actual operation on the commercial line. As of October, test result is good without severe problems. After 100,000km of test operation, the EMU will be delivered to operation cooperation for th commercial optertion.

1. 서론

국내 대도시에서 운행되고 있는 전동차의 주요 전장품은 호선별로 대부분 외국에서 수입하여 국내 차량 제작사에서 조립하여 적용되고 있는 실정이다. 이 전장품들은 각 호선별로 제작사양이 다르기 때문에 운영 및 유지보수 등에 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위해 한국철도기술연구원 주관으로 도시철도차량 표준화·국산화 연구개발사업을 추진하여 주요 전장품인 추진제어장치, 종합제어장치, 신호제어장치 등 차량의 핵심기술과 경량구조의 알루미늄 차체를 개발하여 이미 성능시험(구성품, 완성차, 본선시운전)을 마친 상태이다.

개발된 표준전동차 및 핵심 전장품을 실용화 시키기 위해서는 검증된 차량이 장기간 사용 해도 안전 및 성능에 문제가 없는지 확인하는 내구성 시험이 요구되어 상주공장 시운전 노선에서 10만km 주행을 목표로 표준전동차 내구도 주행시험을 실시하고 있다.

본 보고서는 주행시험을 통하여 초기 시스템이 불안정화 단계에서 발생 가능성이 있는 시스템간의 인터페이스 및 고장사례를 분석하여 개선함으로써 표준전동차 및 핵심장치에 대한 신뢰성을 확보하여 수입에 의존하던 주요 장치들을 실용화하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

*** 한국철도기술연구원 수석연구원

2. 표준전동차 주행시험 추진 현황

2.1 목적

표준전동차의 주행 내구도시험을 통해 검출된 고장내역을 분석하여 수정/보완하고 주행안전성 확보를 위해 영업노선에서 보다 가혹한 조건으로 차량을 운행하여 신뢰성을 확보함으로써 개발된 표준전동차 및 핵심장치가 실용화 될 수 있도록 하고자 한다.

2.2 일반사항 및 시험현황

- 1) 시험 장소 : 한국철도차량(주) 상주공장 시험선
- 2) 시험선 길이 : 약 1km(운행노선)
- 3) 차량 운행
 - 운전 방법 : 수동운전모드, 자동운전모드
 - 운행 조건 : 공차 및 만차(량당 20 ton 기준)
- 3) 시험기간 및 누적 총주행거리 : 2001. 1. 11 ~ 현재, 약 7만km(9월말 기준)

2.3 주요 주행 시험항목 및 내용

시험 항목	시험 내용
대차장치 내구도시험	공차시 실동용력 측정, 단축하중 피로강도 시험, 안전수평 설계 기준 피로강도평가 등
ATC/ATO 지상신호 연계동작 시험	ADU동작시험, ATC동작시험, TWC시험, ATC시험, 속도감지시험 등
집전장치 내구도시험	압상력 시험, 상승/하강시간 시험, 최저작동 공기압력 시험, 공기누설시험, 펜헤드 추종성 시험 등
제동장치 내구도시험	정차제동시험, 보안제동시험, 주차제동시험, 상용최대 제동시험, 비상제동시험
환경시험 (소음, 진동 승차감)	소음시험(차외, 차내, 운전실), 진동시험, 승차감시험,
추진제어장치 내구성시험	외관상태, 절연저항 측정, 가속특성시험, 회생제동 확인시험 등
종합제어장치 내구도시험	전속확인시험, 열차보조제어시험, ATC/ATO지원 기능시험등
VVVf인버터 프로그램조정시험	모터과전류 발생억제, Slip Slide발생시 과전류에 의한 차량 충격완화등

2.4 주요고장 및 조치사항

고장 내역	고장 조치 내역
제동 불완해검지	제동장치 BOU 안에 있는 EPR2A(전공변환중계밸브) MI/M2 CAR 부품교환(4개)
Pan. PS1, PS2 압력저하	감압변 교환
차륜 스키드 발생	특별한 조치는 없음(눈, 비 등 레일이 젖어 있는경우에 발생)
공기압축기 유온이상	교환주기 6개월이 경과됨에 따라 소모품 교환 (오일, 오일필터, 공기여과기, 기름/오일 여과기)
후부 대차 A/S압력이상	레벨링 밸브 배관 파이프 체결부에서 누기 발생됨에 따라 조치완료
Window Wipe 고장	Window Wipe 모터 교체
속도편차	속도계와 실제속도 차이 발생로 코메타 교환
공기압축기 오일 누유	흡입밸브 부품교환
인통선 논리회로 이상신호 출력	제동장치와 TCMS와의 인터페이스 문제로 제동장치의 인통선 논리회로 이상검지 조건을 3회에서 5회로 프로그램 수정 완료
TM 과전류 검지	Notch OFF(타행시)후 제동 또는 가속시 과전류가 발생됨에 따라 프로그램 수정후 현차시험결과 이상적인 파형을 얻음

3. 표준전동차 내구도 주행시험

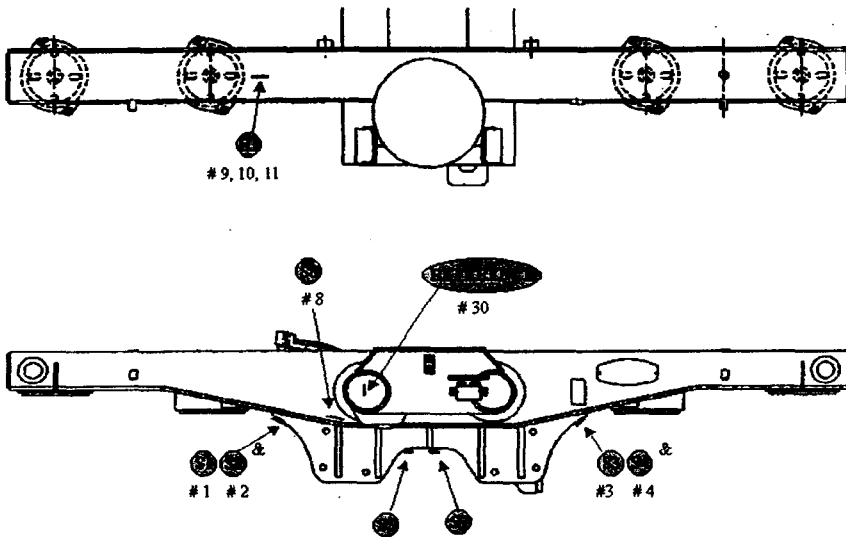
3.1 대차장치 내구도시험

3.1.1 개요

본 연구에서는 표준 전동차 대차들의 운용하중이력을 측정 및 피로강도해석을 수행하여 안전성평가 및 대차들의 경량화 설계를 위한 기준자료를 체계화 하고자 한다. 응력해석에서 취약부위로 예측되는 부위에 단축 및 3축 스트레인 게이지를 부착하여 4만 Km 주행 후에 실제 운행중 발생하는 실동응력을 측정하여 피로강도해석을 수행하였다.

3.1.2 대차틀 실동응력 측정 및 내용

아래 그림과 단축 스트레인 게이지 9개와 450rosette 게이지 7개를 유한요소해석으로부터 취약부위로 판단되는 위치에 부착하였다. 유한요소해석 결과 하중 형식 및 방향에 따라서 주응력 방향이 변하지 않는 위치에는 단축 스트레인 게이지를 부착 하였으며, 주응력 방향이 크게 변하는 위치에는 rosette 게이지를 부착하였다.



3.1.3 공차시 실동응력 측정 결과

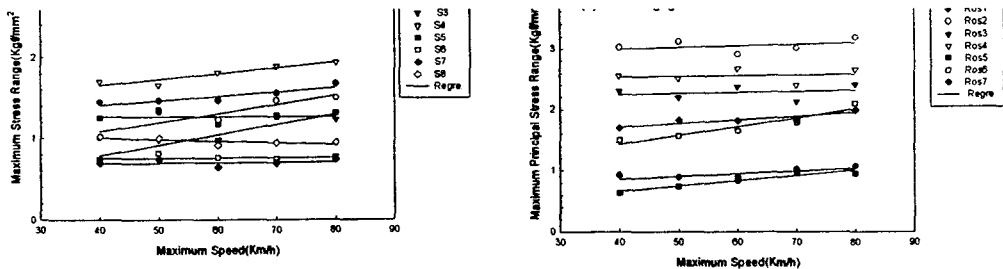


그림 최대속도와 최대응력진폭의 관계

표 1.1 대차들이 받고있는 평균응력

게이지 번호	평균응력 (Kgf/mm ²)	재 질	부 위
S1	3.58	SWS490A	사상부
S2	3.85	SWS490A	사상부
S3	3.98	SWS490A	사상부
S4	4.69	SWS490A	사상부
S5	4.87	SWS490A	사상부
S6	0.01	SS400	용접부
S7	0.21	SWS490A	사상부
S8	1.75	SWS490A	사상부

3.1.3 대차들 실동응력 측정 및 피로강도평가 결과

단축 및 다축하중을 측정하여 표준전동차의 대차들 피로강도를 평가한 결과 두 하중조건 모두에서 안전계수가 최소 5이상으로 평가되어 표준전동차의 대차들은 사용내구수명까지 안전한 것으로 평가된다. 그러나 이 결과는 공차하중 조건으로 직선궤도에서 시험한 결과를 이용한 것이므로 추후 만차하중 및 본선에서 측정한 결과를 이용하여 표준전동차의 대차들 피로강도를 평가해야 완전한 평가가 될 것이다.

3.2 제동장치 내구도시험

3.2.1 개요

제동장치시스템 및 그 구성품에 대해 내구도시험을 수행한다

3.2.2 시험의 종류 및 내용

가) 시험의 종류

- (1) 정차 시험 : 정차제동시험, 보안제동시험, 주차제동시험
- (2) 주행 시험 : 상용최대제동시험, 비상제동시험

3.2.3 시험 결과

항 목		기 준 치		시험결과
정차 시험 (M-Tc)	정차제동 (공차)	M	0.8±0.2 kgf/cm ² [78±20kPa]	0.8
		T	1.2±0.2 kgf/cm ² [117±20kPa]	1.2
	보안제동	4.00±0.2[392±20kPa]		4.0
	주차제동	주차제동이 체결되고, 역행이 차단 될 것.		양호
주행 시험	상용최대제동	공차:3.5 km/h/s 이상		3.69
		만차:3.5 km/h/s 이상		3.73
	비상제동	공차:4.5 km/h/s 이상		4.81
		만차:4.5 km/h/s 이상		4.61

3.3 추진제어장치 내구도시험

3.3.1 외관상태확인

- 1) Box 및 Cover의 변형, 손상등의 점검
- 2) Packing의 탄력성 확인
- 3) Box내 전선의 열화, 조임상태 등의 확인
- 4) 압착단자의 열화, 조임상태 등의 확인
- 5) 각 CANNON의 체결상태, 핀 빠짐등의 확인
- 6) BOX내 오염상태 확인 및 청소
- 7) HEAT PIPE의 오염상태 확인 및 청소
- 8) OIL CAPACITOR의 외관상태 확인
- 9) 각 PCB류의 기관변색, 고정상태 등의 확인

10) BOX 내외부 각 정병류의 조임상태 확인

3.3.2 절연저항 측정

고압부, 저압부 접지간 : 400M Ω , 저압부 접지간 : 2000M Ω

3.3.3 가속특성확인

0~80 km/h로 가속할 때 5~35km/h 사이의 영역에서 가속도가 3.0km/h/s 이상을 확인한다. 출발시 P4단으로 가속한다.

3.3.4 회생제동 확인

80~0 km/h로 감속할 때 60~20km/h 사이의 영역에서 감속도가 3.5km/h/s 이상을 확인한다. 제동시 B7단으로 감속한다.

3.3.5 무부하 회생제동 동작확인

회생부하 OFF 상태에서 제동 투입시 발전제동 동작 여부 확인

3.3.6 온도특성 확인

- 1) INVERTER UNIT V상의 HEAT PIPE부 : 65℃이하
- 2) OVT UNIT의 HEAT PIPE 부 : 49℃이하
- 3) P측 BUS BAR 표면 : 60℃이하
- 4) N측 BUS BAR 표면 : 60℃이하
- 5) 주회로 입력 511선 표면 : 54℃이하
- 6) 주회로 출력 V상선 표면 : 54℃이하

3.3.7 측정 결과

- 1) 외관상태확인 : 이상 없음
- 2) 절연저항측정 :
 - 고압부, 저압부 접지간 : 10M Ω , 저압부 접지간 : 10M Ω
- 3) 가속특성확인 : 가속도 : 3.26 km/h/s(차륜경 820mm)
- 4) 회생제동 확인 : 감속도 : 3.57 km/h/s
- 5) 무부하 회생제동 동작확인 : 회생부하 OFF 상태에서 제동 투입시 발전제동이 5초간 동작하고 90초 이내에는 발전제동이 동작하지 않는 것을 확인한다.
- 6) 온도특성 확인 : 부위별 기준 온도 범위내에서 작동

3.4 종합제어장치 내구도시험

3.4.1 개요

종합제어장치 내구도시험은 표준전동차가 일정 주행거리를 주행한 후에 종합제어장치의 기능이 제대로 동작하는지를 검사하는 시험으로 주로 인터페이스 시험과 기능시험으로 구성된다.

3.4.2 시험항목 및 내용

1) 전송확인시험

가) TCMS주통신 전송확인시험

나) ATC, ATO, TWC, PISC, TRS, VVVF, ECU, SIV, CM-INV, EN/DECODER와의 전송 확인시험

2) 열차보조제어 시험

가) 전두부 제어

나) 무인운전, 자동운전, 수동운전, 기지운전, 비상운전모드에서의 종합제어장치의 전두부 제어계전기, 후부차 제어계전기 동작을 확인한다.

3) ATO장치 지원기능

가) 종합제어장치의 자동열차운전장치에 대한 운전금지 기능확인시험

나) 종합제어장치의 자동열차운전장치 활성화 기능 확인시험

4) ATC장치 지원기능

무인운전, 자동운전, 수동운전, 비상운전모드에서의 ATC전원제어 기능을 확인

5) 열차지연신호 전송확인

열차가 지연되는 경우 TWC 경유로 TTC로 지연신호 전송을 확인

6) 열차번호 제어

모니터장치에서 열번호확인 및 종합제어장치로 부터 TWC, PA, TRS, PISC로의 송신을 확인

7) 열차편성길이 제어

TWC에 대한 열차길이 송신확인 및 PA, PISC에 대한 전송상태를 확인

8) 주 시각제어

종합제어장치와 접속기기에 대한 시각 송신을 확인

9) 휠 직경 보정기능

차륜경 설정을 수동으로 행하는 것을 확인

10) 모니터 현시기능

가) 기기 동작상태, 열차번호, 노치값, 승차율 등의 표시확인

나) 고장발생의 경우 고장명칭 등의 정보 표시를 확인

11) 고장 경보기능

고장발생의 경우 고장 램프를 점등하고 부저 울림을 확인

12) 백업기능

종합제어장치에서 각 기기가 고장난 때의 백업이 정상으로 되는 것을 확인

13) 차상검사

가) 일상검사에 대한 정상실행을 모니터 장치로 확인

나) 출고전 시험에 대한 정상실행을 모니터 장치로 확인

3.4.2 시험 결과

시험 항목	확인 사항	결 과
전송확인시험	TCMS 주통신 전송확인	양 호
	주변장치와의 통신 확인	양 호
열차보조제어시험	Head Control ; Driverless, Automatic, Manual, Yard, Emergency Mode에서의 TCMS가 제어하는 HCR,TCR의 동작을 확인.	양 호
	Mode Control ; ATC로 부터의 전송에 의해 지시되는 Operation Mode의 설정을 확인.	양 호
	Dead Man; 입력 검지에 의한 TCMS 처리를 확인	양 호
ATO 장치 지원기능	종합제어장치의 자동열차운전장치 활성화기능 확인	양 호
ATC 장치 지원기능	각 운전모드에서 ATC장치의 전원제어기능 확인	양 호
열차자연신호전송확인	열차가 자연되는 경우 TWC 경우 열차자연신호 발생여부 확인	양 호
열차번호제어	모니터상에서 열번호확인 및 TWC, PA, TRS, PISC 로 열 번전송확인	양 호
열차편성길이제어	TWC, PA, PISC로 열차편성길이 정보전송 확인	양 호
주시각제어	종합제어장치와 접속기기에 주시각 송신기능확인	양 호
휠직경보정기능	종합제어장치의 휠직경보정기능확인	양 호
모니터현시기능	기기동작상태, 열차번호, 노치값, 승차율 등의 표시확인	양 호
	고장발생의 경우 고장명칭 등의 정보표시를 확인	
고장경보기능	고장발생의 경우 고장램프를 점등하고 부저 울림을 확인	양 호
백업기능	종합제어장치에서 각 백업기능이 정상적으로 되는 지 확인	양 호
차상검사	일상검사에 대한 정상실행을 Display Unit로 확인.	양 호
	PDT에 대한 정상실행을 Display Unit로 확인.	양 호
	월상검사에 대한 정상실행을 Display Unit로 확인.	양 호

3.5 ATC/ATO 장치 내구도시험

3.5.1 개요

본 시험은 표준전동차 내구도 시험 중 ATC/ATO/TWC/TRA 차상장치의 정확한 기능을 입증 하기 위함이며, 동적 시험은 AF 궤도회로와 TWC 루프가 설치되어 조정이 완료된 시험구간에서 차량을 설치하여 수행하였다

3.5.2 가지내 시운전 선로상에서 정지 시험

- 1) ADU 동작시험 : ADU의 현상태를 점검
- 2) ATC 동작시험

4. 결론 및 향후 연구방향

본 논문은 도시철도 표준화·국산화 사업을 통해 개발된 표준전동차의 내구도 주행시험에 대한 내용과 시험결과를 기술하였다. 누적 총주행거리는 약 7만km로 운행하는데 큰 고장없이 시스템이 안정화되어 있음을 볼 수 있다. 초기 단계에서는 제작상의 하자발생(레벨링 밸브 파이프 체결 불량) 및 상용화된 제동장치의 일부 부품의 고장(전공변환중계밸브, 감압변 등)이 있었으며, 핵심장치 중 인버터에 TM 과전류 검지가 발생되었으나 프로그램 수정후 현차시험에서 나타나는 바와 같이 정상적인 전류의 파형을 갖고 있다. 또한, 제동장치와 TCMS와의 인터페이스 문제로 인통선 논리 회로 이상검지가 발생되었으나 이상검지조건을 3회에서 5회로 프로그램을 수정하여 해결되었다.

표준전동차 주행 내구도 시험 운행조건은 영업노선보다 가혹한 조건 [(역정차 시간없음, 선로상태불량(분기점 3개지점 통과, 노선길이 약 1km), 점심시간 운행, 만차/공차 병행, 일 주행거리 400km/일 짧은 제동거리등)]으로 운행되고 있으나 대차 내구도 시험결과 및 주요전장품 시험결과에서 나타낸 바와 같이 양호한 결과를 나타내고 있다.

지상설비연계동작시험은 시험구간에서 자동/무인운전 모드로 실시하여 양호한 결과를 얻었으나 지상 및 차상장치의 시스템 불안정으로 지속적인 시험이 요구되며 아울러, 국내 호선별로 신호시스템이 상이함에 따라 어느 구간이라도 전동차를 운행할 수 있는 신호시스템의 표준화가 시급한 실정이다. 본 시험을 통해서 ATC에 ATS의 기능을 추가하여 실용화를 위한 개조를 준비해야 할 것이다.

향후, 표준전동차 내구도 주행시험을 10만km 달성한 연후에 신호장치의 개조와 출입문장치의 실용화 등 신뢰성이 충분히 입증되면 영업노선에 투입하고자 하며 내구도 주행시험의 완료로 표준화체계 정착에 밑거름이 될 것이다.

- 가) 속도 코드: ATC의 속도 신호 디코드 능력을 확인하기 위함이다. TWC Loop 상에 열차를 정지시키고 지상으로부터 각 코드를 수신하는지 확인
 - 나) 기지모드(Yard Mode) : Yard Mode 신호들을 디코드하는 능력을 시험
 - 다) 출입문 개방신호 : ATC의 출입문 개방신호를 디코드하는 능력을 시험
 - 라) Key Up/Key Down 시험 : Key Up/Down 신호를 디코드하는 ATC의 능력을 시험
- 3) TWC 시험 : 지상설비와 TWC의 통신 능력을 시험

3.5.3 열차주행시험

ATC/ATO/TWC/TRA 시스템의 주행과 관련한 동적 성능을 시험하기 위함이며 이 시험은 기지내 시운전 선로에서 사령실의 지원으로 주행을 실시한다.

1) ATC 시험

- 가) 기지운전모드(Yard Mode) 동작
- 나) 속도 감지
- 다) Yard Mode의 과속
- 라) 정지 후 진행모드(Stop & Proceed) 동작시험
- 마) 수동운전모드에서의 과속감지기능

2) TRA 감지시험 : 열차 운행 중 PSM 마커 감지 상태를 점검

3) 열차 자동 운전 시험

- 가) 자동운전 출발시험
- 나) 정상 역간 주행

4) 무인 운전 모드 : 무인 운전 출발시험 및 다음 역에서 열차가 정차 후 출입문 자동 개폐 시퀀스가 수행되는지 확인하고, 주간제어기를 FSB로 설정

3.6 집전장치 내구도시험

3.6.1 개요

집전장치에 대한 성능과 사용에 따른 문제점이 없는지 내구도 시험을 수행하였다.

3.6.2 시험 항목 및 내용

2) 시험의 방법

가) 압상력 시험

조작공기 압력 5kgf/cm²로 습판체 상면을 1분간 3m정도의 속도로 상승 및 하강 시켰을 때 압상력 측정

나) 상승/하강시간 시험

5 kgf/cm²의 공기압력으로 작동 시켰을 때 동작되는 시간측정

다) 최저 작동공기 압력시험

4 kgf/cm²의 공기압력에서도 상승여부 확인

라) 공기 누설시험

판도그래프의 공기 관에 9 kgf/cm²의 공기압력을 공급한 후 누기여부 확인

마) 팬헤드 추종성 시험

판도그래프의 헤드가 원활한가를 최대 및 최소작용높이에서 시험하며, 이때 회전각도는 수평에서 약 10° 이상여부 확인

3.6.3 시험 결과

항목	기준치		시험결과
	상승시	4.5kgf이상	
압상력시험	하강시	7.5kgf이상	7.1
	10~14초 범위일것		12초
상승시간	4~6초 범위일것		5초
하강시간	4kgf/cm ² 의 공기압력에서 상승될것		이상없음
최저작동 공기압력 시험	판도그래프의 공기관에 누설이 없을 것		이상없음
공기누설시험	회전각도가 수평에서 약 10° 이상일 것		12°
팬헤드 추종성시험			