

한국형 경량전철시스템의 유지보수 이력에 대한 평가

A Evaluation of Maintenance History for K-AGT

이호용* 류상환** 조홍식** 조봉관** 장률**
Lee, Ho-Yong Ryu, Sang-Hwan Cho, Hong-Shik Cho, Bong-Kwan Jang, Yul

ABSTRACT

The K-AGT test line is managed similarly to revenue operation and operated automatically 120km per day, total 90,000km from August 2004 to December 2007. To enhance reliability of developed system, maintenance information system based on RCM is applied. The maintenance program applied in test line is based on RCM which prevent a fault before it happens and a fault made in test line is analysed by reliability growth test. Vehicle system, power supply system, signalling system, track and infrastructure are built in test line and it is reviewed enhancing system performance and changing designs to commercialize through reliability growth analysis method.

1. 서 론

무인운전경량전철은 차량, 기계부품, 전기, 전자 및 제어, 정보통신, 재료, 토목 등의 종합적인 기술이 연계되어 있을 뿐만 아니라 차량시스템, 전력공급시스템, 신호 및 통신시스템, 선로구축물 등으로 이루어진 대형복합시스템으로서 무인운전을 전제로 한 시스템이므로 관련된 부품 및 시스템 개발에 있어서 특히 안전성과 신뢰성을 중요시하는 시스템 엔지니어링 기술의 적용이 우선적으로 요구된다.[1]

철도 선진국인 프랑스, 독일, 일본 등에서는 각기 고유한 철도 시스템을 설계 및 제작하는 과정에서 오랜 세월동안 나름대로의 시스템 기술을 축적해왔다. 그러나 최근에 들어 고무차륜 AGT 시험선을 건설하였으며 이는 철도 106년 역사상 처음으로 확보한 종합시험선이다. 이러한 시설을 이용하여 기술을 고도화 및 선진화하고 지자체에 대한 기술지원을 목적으로 시험선을 이용하고 있다.

최근 국제 입찰의 경우 시스템의 신뢰성을 중요시하여 제작사양서에 신뢰성의 조건(요구사항)을 충족시키도록 요구하고 있으므로 해외 수출시의 필수 요건을 충족해야하지만 무인운전 고무차륜 AGT 시스템 시험선 이외에는 운행한 실적이 없어 어려움을 겪고 있다. 특히 무선통신을 기반으로한 세계 최초의 무인운전시스템을 개발하였으므로 신뢰성 평가시험으로 경량전철 운영에 적용 가능한 유지보수 자료 확보가 필요하며, 체계적인 DB 구축을 위해 유지보수 예방보전 및 전문가시스템 프로그램을 개발하였다.[2] 운영상에 필요한 유지보수 작업 효율 향상을 위한 목적으로 RAM(Reliability, Availability, Maintainability) 향상 연구를 추진하였다. 이러한 목적으로 K-AGT 시험선에서는 하루 평균 120km를 운영환경과 유사하게 운영 및 관리하고 있다. 무인운전 누적 주행거리는 2004년 8월부터 2007년 12월까지 90,000km를 달성하였다. 개발된 시스템의 신뢰성을 향상하기 위해서는 RCM(Reliability Centered Maintenance) 기반의 유지보수 정보화시스템의 활용으로 유지보수 검사를 수행하며 유지보수 추진방향은 고장을 사전에 예방하는 RCM을 기반으로 유지보수를 실시하였다. 시험선에서 발생한 고장에 대한 분석 방법은 신뢰성 성장시험을 통해 실시하였다. 시험선에는 차량시스템, 전력시스템, 신호시스템, 선로구축물 등의 성능개선 및 상용화를 위해 설계변경을 검토하였다.[3]

* 한국철도기술연구원, 도시교통기술개발센터, 정회원
E-mail : hylee@krri.re.kr

2. 본 문

2.1 차량시스템 주요 유지보수 이력

2.1.1 차량도어 리미티드 스위치 접점불량

고장현상은 선로 점검 및 DIA 운영을 위해 차량이 D역사에 정위치 정차(결합중) 일 때, 차량도어는 개폐동작하고 PSD는 동작을 하지 않았다. 이에 대한 고장영향으로 차량도어 상태가 TCMS로 전달되어 차상 CBTC로 전달되도록 되어 있는데 도어는 정상작동하지만 차량도어(MC1. 1-2) 리미티드 스위치 접점 불량으로 인해 도어 신호가 DIR1 계전기에 정상적으로 전달되지 못해 'All Door Close' 신호가 스크린도어가 작동이 되지 않고, 무인 DIA운영 자체가 불가능한 상태가 되었다.

이에 대한 조치내용으로 차량 도어(MC1. 1-2) BY BASS 후 도어 All Door Close 신호(DIR1 계전기)가 차상 CBTC로 정상적으로 전송됨을 확인하고, 시험적으로 무인운전모드 운영을 하여 정상적으로 운행되는 것을 확인하였다. 차량 도어 리미티드 스위치 교체 작업 중에 MC1. 1-2 리미티드 스위치의 연결선이 단락된 것을 발견하고 연결조치 후 도어 및 신호전달이 정상적인 것을 발견하여 리미티드 스위치 교체로 문제를 해결하고, 정상운행을 확인하였다. 설계 반영사항으로 간단한 고장이지만 현장에서 원인 파악이 힘들었던 사례이다. 추후 같은 상황 발생 가능성을 염두에 두고, 고장 발생시에 빠른 조치를 취해야한다. 현재 실용화단계에서는 공기식 도어에서 전기식으로 설계를 변경하였다.



그림 1 도어는 열렸지만 스크린도어는 닫힌 상태

2.1.2 정위치 정차를 위한 VVVF 인버터 가속도 측정 및 조정

차량 미정차 현상 발생 빈도가 높아지는 현상이 발생하여 차량의 주행성능 향상을 위해 가속도 VVVF 측정 및 조정을 하였고, 그에 대한 무인운전시의 데이터를 측정하여 분석한 결과 표1과 표2에서와 같은 데이터 측정하였다. 이에 대해 가속도 조정 후 미정차 항목뿐만 아니라 각각의 항목 전체의 발생수가 눈에 띄게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

표 1. 가속도 조정 전 측정치

노치	기준치 (Km/h/s)	측정된 가속도 (Km/h/s)	
		1차 측정	2차 측정
P1	0.875	0.99	1.00
		2차 측정	1.00
P2	1.75	2.08	2.08
		2차 측정	2.08
P3	2.625	2.88	2.94
		2차 측정	2.94
P4	3.5	3.2	3.125
		2차 측정	3.125

표 2. 가속도 조정 후 측정치

노치	기준치 (Km/h/s)	측정된 가속도 (Km/h/s)	
		1차 측정	2차 측정
P1	0.875	0.91	0.877
		2차 측정	0.877
P2	1.75	1.76	1.83
		2차 측정	1.83
P3	2.625	2.54	2.54
		2차 측정	2.54
P4	3.5	3.49	3.45
		2차 측정	3.45

2.1.3 집전장치로 인한 64p 계전기 작용에 대한 조치

비로 인해 집전장치 절연판에 빗물이 스며들면서 누전되어 64p 동작이 일어났다. 고장원인으로는 조립하는 과정에서 집전자베어링 유착 및 방수처리 미흡으로 인해 발생한 것으로 분석되었다. 이에 대한 대책으로 집전슈의 볼트 취부부를 없애 마모한도를 증가 시키고 베이스의 재질을 FRP에서 BMC로 변경하여 내구성을 증가 시켰다. 기존의 K-AGT I의 경우 정극 집전장치가 휴즈박스 일체형으로 설계 되었지만 실용화 단계에서는 집전장치와 휴즈박스를 분리하여 정극 부극 집전장치의 호환이 가능도록 설계를 변경하였다.

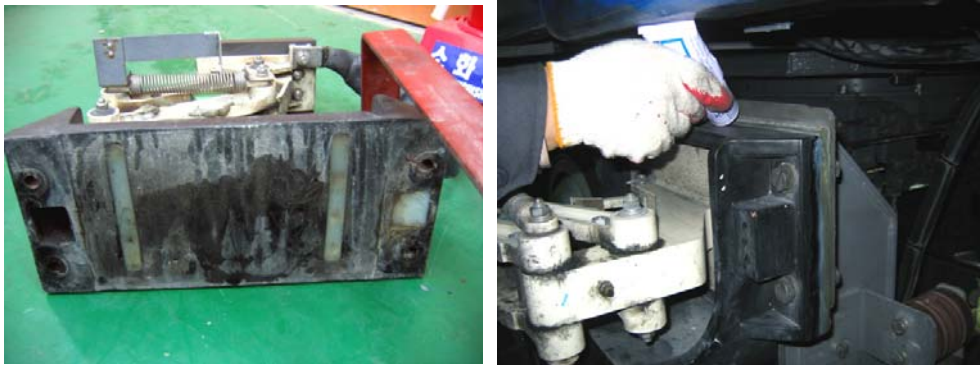


그림 2 집전장치 방수처리작업

2.1.4 집전장치 파손으로 인한 교체

차량 운행 중 진동으로 인해 절연판과 집전슈 연결 링크 부분(STUD BOLT) 이완으로 너트 빠짐으로 인해 집전장치 일부가 이탈되면서 파손이 되어져 운행 불가능하였다. 개발품은 차량 진동으로 인해 집전장치 연결 링크 부분(STUD BOLT)의 너트가 쉽게 빠지는 구조로 되어 있어, 집전장치의 구조적인 문제로 인한 고장 재발 가능성은 여전히 남아 있다. 따라서 설계구조변경 및 부속품변경으로 이를 미연에 방지하여야 하겠고, 차량 집전장치의 구조변경 후 교체의 필요성 요구된다.

2.1.5 보조전원장치(SIV)에 대한 조치사항

차량 운행 중 또는 정차 시 보조전원장치(SIV) 전원 OFF로 인해 차량 DIA 운행이 멈추는 현상이 발생하였는데 정확한 원인은 밝혀지지 않고 있다. 특히 차량 운행 도중의 SIV OFF 시에는 비상제동이 체



그림 3 파손된 집전장치 및 집전장치 STUD BOLT 이탈
 결되지 않고 차량 운행 감속도에 의해 차량이 정지하였다. 현재 차량에 장착된 장치는 차량 내의 냉난방 장치를 시작으로 조명장치, 제어장치 등에 안정된 전력을 공급하는 정지형 보조전원장치(SIV)이다. 고장에 대한 1차 점검으로는 SIV 출력전압, 출력전류 체크를 하였고, 그 결과 기동시 출력전압, 출력전류 측정결과 이상없음과 부하급변(냉방가동, 컴프레서 기동)시에 출력전류가 피크성으로 나타나기는 하나, 고장이 걸린정도까지의 파형은 아님을 확인했다. 단, 냉방기 동작과 컴프레서 기동이 동시에 일어날 경우 보호동작을 할 가능성이 높다. 따라서 보호동작에 의한 SIV 기동 정지시에 비상제동을 신속히 할 수 있는 방법을 강구하여야 했다. 고장에 대한 2차 점검은 SIV 제어기 수리 및 프로그램을 수정(SIV-TCMS간 고장신호 추가, SIV-TCMS간 통신 I/F 변경)하였고, 고장시 비상제동이 동작하도록 조치하였다. 실용화에서는 한쪽 스택이 고장나면 다른 한쪽에서 회로구성이 가능하도록 이중계 구성을 하여 한쪽 계통이 고장나더라도 최소한의 전원공급이 가능한 이중계로 구성된다.

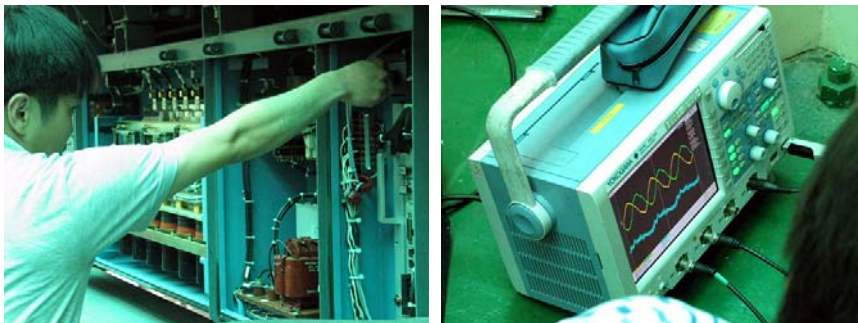


그림 4 보조전원장치(SIV) 출력전압, 출력전류 체크

2.2 신호시스템 성능평가 및 유지보수 이력

RAM 목표는 유사시스템의 목표활용, 운영규정에 따른 역산, 제작사의 제안사항에 대한 승인 등의 다양한 방법이 적용하여 설정할 수 있으며 목표요구사항은 신뢰도 예측, 신뢰성시험(현장시험이 불가능한 경우) 또는 시운전시험(현장시험이 가능한 경우)을 통한 신뢰도 입증을 수행하여 검증된다. 본 연구에서는 무인경량전철 K-AGT의 신뢰성을 입증을 위해 경전철시험선에서 주행시험 기간 동안 통신기반 열차제어 차상장치와 무선통신장치의 성능과 고장유무를 평가하였다. 평가결과 정상적으로 동작하고 있는 것을 확인하였다.

2.2.1 통신기반열차제어 성능 시험

통신기반열차제어 차상장치와 기타 차량시스템간의 인터페이스 및 기능이 정상적으로 동작하는지 확인하였고, 통신기반열차제어 차상장치와 지상장치의 연계 동작 시험을 하여 통신기반열차제어 차상장치의 성능과 기능을 검증하였다. 모든 시험 항목에 대해 통신기반열차제어 차상장치가 양호한 결과를 보였다. 지상에 무선통신장치는 10대가 설치되고 2개 편성에는 각각 2대의 무선통신장치가 탑재된다. 열차가 시험선로를 주행할 때 무선통신(열차-지상 무선통신장치, 지상-지상 무선통신장치)을 통해 무인 제어

된다. 무선통신장치는 정보통신부로부터 실험국으로 허가 받아 운용되고 있으며 사용하는 주파수대역은 2.42475~2.45575GHz이며 출력은 500mW이다. 송신전력은 정통부로부터 허가받은 기준으로 사용되어야 하고 송신전력의 변화는 전체 통신기반열차제어시스템의 성능에 영향을 주기 때문에 무선통신장치의 출력을 측정 및 평가하였다. 측정결과 송신전력은 500mW (27dBm)에 근접하였고 무선통신장치의 RF회로에 정상적으로 동작함을 알 수 있었다. 그림 5는 WRS884의 무선통신장치 출력포트에 스펙트럼 분석기를 설치하여 측정한 전력밀도이다. 마커1의 값은 11.8 dBm 이었으며 RBW (Resolution Bandwidth)와 점유대역폭 3MHz를 고려하면 평균전력은

$$11.8 + 10\log_{10}(3\text{MHz}/100\text{KHz}) = 26.6 \text{ dBm} < 27 \text{ dBm}$$

으로 구해진다.

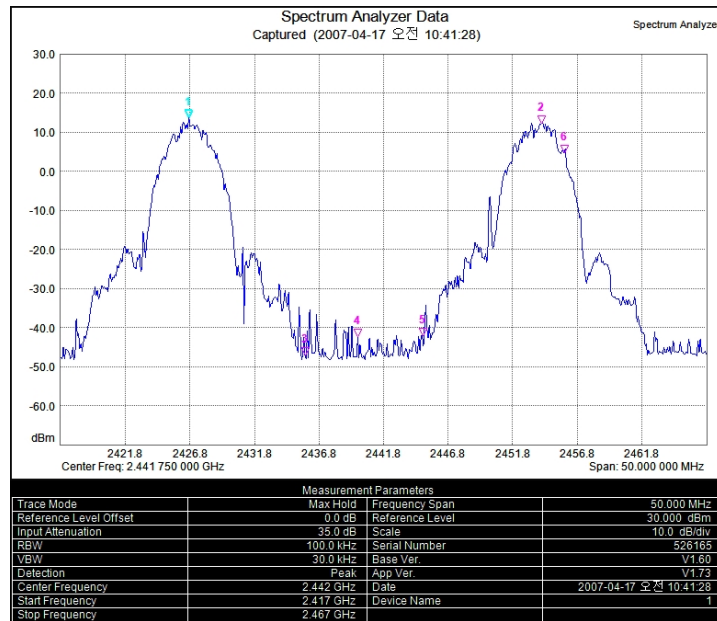


그림 5 WRS884의 스펙트럼 분석기 출력

2.2.2 신호설비 고장(낙뢰로 인한 무선기 고장)

시험선에서 천둥번개를 동반한 강우시 현장 선로변의 특정 무선기(WRS 880, 881)가 고장으로 동작하지 않는 운행 장애사례가 발생하였다. 이를 CBTC 지상장치의 AATC 표시부 화면에서 WRS 880, 881 무선기가 적색으로 표시된 것을 확인하고 현장의 WRS 880, 881 무선기 Fault 확인하였다. 조치사항으로는 WRS 880의 전원 Reset 후 동작을 확인하고 WRS 881를 교체 후 동작을 확인하였다. 금번 발생한 선로변 무선기 고장은 낙뢰의 영향인 것으로 추정하지만 정확한 원인분석은 아직 진행중이다. 무선기의 고장은 공급사에 의뢰한 상황이며, 전원차단기가 동작한 것을 포함하여 전원측으로 유입된 서지에 대한 보호대책을 검토중이다. 통상적으로 낙뢰발생에 의한 장애시 원인규명은 서지의 유입경로를 조사분석하여 서지유입경로를 차단하거나, 보호설비를 설치하여 서지로부터 장치를 보호하고 정상적인 운영을 유지하도록 조치를 취하고 있다. 경산시험선의 무선기 설치환경은 개별접지를 취하고 있으며, 단기적으로 차단기가 동작한 무선기를 공동접지로 바꾸는 조치를 취하였으나 향후 중장기적으로 서지카운터 기능을 가진 서지보호기를 설치하여 낙뢰에 대해 보호대책을 수립할 계획이다.



그림 6 WRS 881 무선기 교체 및 교체 후 무선기 상태 확인

2.3 선로구축물 신뢰성 평가 및 유지보수이력

2.3.1 고무차륜 경전철의 신축이음매 장치

안내레일의 신축이음에서 구조상 발생하는 진동이 승차감에 미치는 영향이 크다는 것을 평가하였으며 이에 대한 대책이 필요하다는 결론을 얻었다. 따라서 이 장치에 대한 개발이 필요하여 우리나라 환경에 맞는 새로운 type 신축이음매를 설계하였다. 시험선의 모든 환경적인 여건을 평가한 결과, 신축이음매 장치는 안내레일에 발생하는 온도변화 또는 복진으로 인해 안내레일에 큰 변위가 생길 경우 변위에 따른 안내레일의 축력의 영향이 구조물에 가해지지 않도록 하는 장치로서 온도 변화량을 40℃로 설정시 (-20℃ ~ +60℃) 10m 1분당 4.6mm의 신축량이 발생한다. 일반구간에서는 안내레일 이음매판에서 수용이 가능하므로 별도의 신축장치가 불필요한 것으로 판단되나, 부가 축력이 발생하는 교량의 조인트부에서는 이음매판의 스트로크로는 신축 흡수가 불가능하므로 신축 흡수량이 큰 종방향 활동 체결구를 적용한 고정 안내판식 신축 이음매장치 등의 별도의 조치가 필요하다.

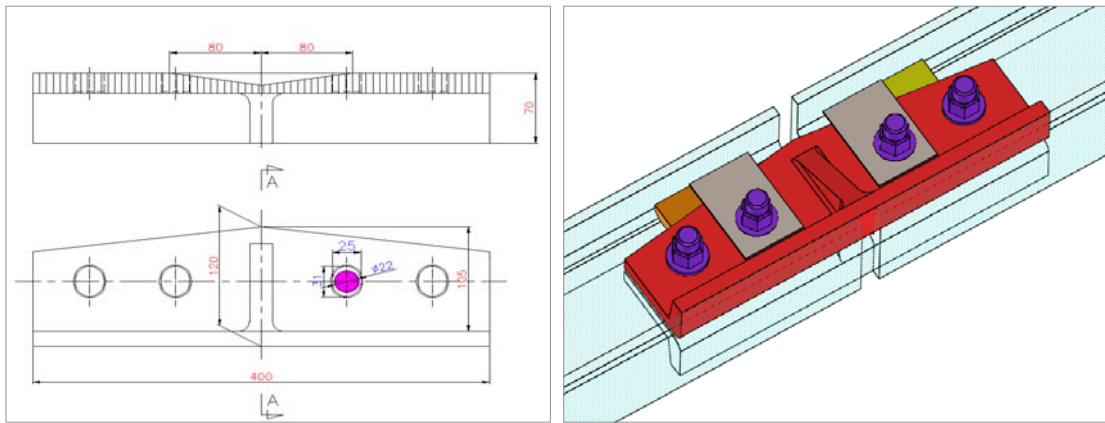


그림 7 이음매판의 구조 및 안내레일 이음매판

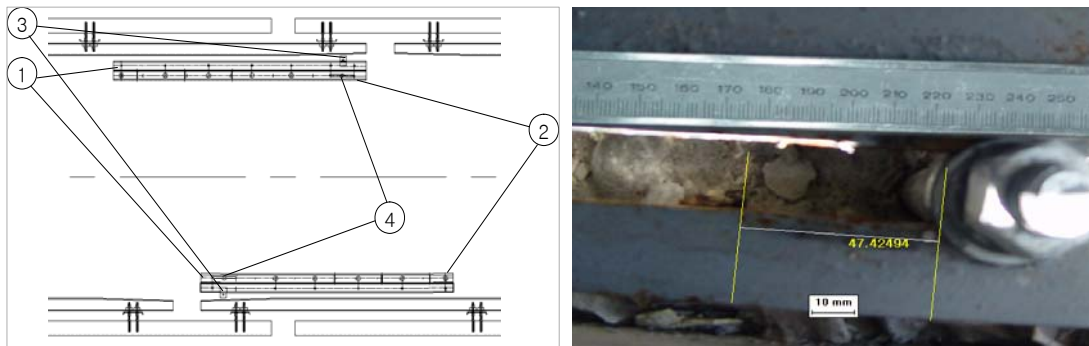


그림 8 신축이음장치 평면도 및 신축량 측정(47.4mm)

이번에 적용한 신축이음매장치는 세계 최초로 개발 적용한 분기륜 유도방식 신축장치이며 신축량 조절이 쉬운 장점이 있다. 설치 후 지난 1년간 신축량을 측정한 결과 경산시험선의 침단역에 올라가는 최급구배구간(3@40m 강박스형교)의 신축장치에서 약 $\pm 47\text{mm}$ 신축이 발생하는 것으로 나타났다.

2.3.2 경사식 신축 이음장치의 적용

기존의 고정안내판식 신축 장치는 분기륜을 유도하여 안내레일의 개구부를 안전하게 통과하는 구조로써 활동 체결구를 사용하여 신축흡수량이 크고, 장홀 길이 변경을 통하여 신축량 조절이 쉬운 장점이 있으나 신축장치 진입시 고정안내판 어프로치에 분기륜이 접촉되는 순간 Attack angle에 의해 충격이

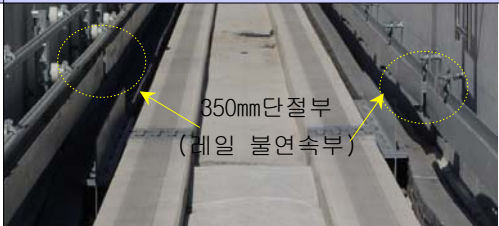
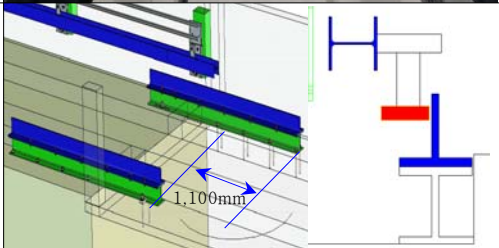
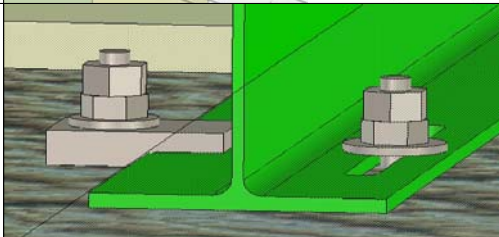

발생되는 구조적 취약점이 있다. 구조적 단점은 시험선에서 주행성능 테스트 결과 승차감 저하, 승객 쏠림현상과 차량 횡진동의 주요한 요인으로 지적되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 안내레일을 경사로 절단하여 이음매판으로 연결하고, 활동부에 장홀을 두어 신축을 흡수 할 수 있는 경사식 신축이음매 장치를 개발하였다. 본 개발품은 별도의 공간이 필요 없고 구조가 간단하며, 경사각 변경시 스트로크 변경이 가능하다. 개발한 경사식 신축이음매 장치의 스트로크는 ± 90mm이다. H150x150 안내레일에서 발생하는 축력은 37.4톤으로 이음매볼트는 M22 x2개로 고정된다. 구조상 취약부는 7mm두께의 플렌지로 나타났다. 이를 보강하기 위하여 10mm 보강판을 플렌지 상, 하면에 용접하여 강도 향상을 이루었다. 활동부 레일에서 장홀부는 신축으로 인한 변위 발생시 마찰이 발생하는 부분으로써 마찰에 의한 마모방지를 위해 부쉬(그림 5.5 ㉑)를 넣어 강도 향상과 원활한 신축을 허용하게 하였다.

- 축력 $P = E \cdot A \cdot \beta \cdot \Delta T = 37.44 \text{ ton}$

ΔT : 온도변화폭 40°C (20°C ~60°C), α : 레일의 선팽창계수 0.0000115/°C, A: 안내레일의 단면적 (3910mm²)

개발된 신축 이음매장치의 특성을 표 3에 간략히 설명하였다.

표 3 신축 이음매장치 기술별 주요 내용

① 고정안내판 신축이음매 장치		
품 명	형 상	기술의 주요 내용
구 조		<ul style="list-style-type: none"> - T형강 230x180x15x15 사용 - 안내레일 불연속 구간 350mm 발생 - 통과시 분기륜과 고정안내판의 접촉으로 약간의 충격 발생 - 어프로치량 5mm
고정안내판		<ul style="list-style-type: none"> - 고정 안내판 길이 3,200mm - 동일한 좌표에 놓지 않고 한쪽이 1,100mm 더 앞쪽에 위치 한쪽을 먼저 유도하여 충격 감소 - 고정안내판 내면간 거리와 반대측 안내레일 사이 간격은 2,725± 5mm
체결구		<ul style="list-style-type: none"> - 종방향 활동체결 방식의 고정블록을 사용하여 신축 허용 - 신축량 ± 150mm (신축량 조정 가능)
② 경사식 신축이음매 장치		
구 조		<ul style="list-style-type: none"> - 통과시 소음과 진동, 충격 없음 - 레이저 절단을 통한 정밀 가공 - 교량과 안내레일에 발생하는 신축을 레일의 변화 없이 흡수 - 안내레일 일체식으로 작업성 우수

① 고정안내판 신축이음매 장치		
품명	형상	기술의 주요 내용
안내레일 (고정부)		<ul style="list-style-type: none"> - 발생 축력 39톤으로 산정 $P = E \cdot A \cdot \beta \cdot \Delta T = 38.44 \text{ ton}$ ΔT: 온도변화폭 40°C (20°C ~ 60°C) α : 레일의 선팽창계수 0.0000115/°C A : 안내레일의 단면적 (3910mm²) - 이음매 볼트의 직경을 M24x2로 설계 - 이음 홈 부분의 강도 보강을 위해 플랜지에 보강판 용접
신축량 산정		<ul style="list-style-type: none"> - 경사각 150/900mm, 스트로크 ± 90mm - 경사각도 변경으로 신축량 조정 가능 - 안내판의 두께 80mm를 고려한 설계

경산 시험선에서 초기에 시범적으로 시공하여 충분한 신뢰성을 확인 후 나머지 3개소에 설치하여 온도 신축량이 많은 여름 및 겨울철 신축에 대한 안전성을 검증하였다.

2.3.3 안내레일 궤간 조정

차량의 좌우방향 안정적인 주행성 확보를 위하여 현재 약 (증)10mm의 공차가 있는 일부구간을 +2mm로 조정하는 궤간 조정 작업을 실시하였다. 안내레일면간 거리는 2,900, -0, +10mm로써 궤간 중심을 기준으로 하였으며, 시험선 시점에서 분기기가 위치한 1k210m구간에서 차량의 최대 속도가 발생하는 구간으로, 안내레일 내면간 거리 공차가 -0mm이므로 측벽 등이 겨울철 기온 저하에 따른 궤간 축소가 발생하므로 전구간을 +2mm로 정밀 조정하였다. 작업은 6월 25일 ~ 7월 10일 사이에 이루어졌으며 평균 기온은 24°C이다.

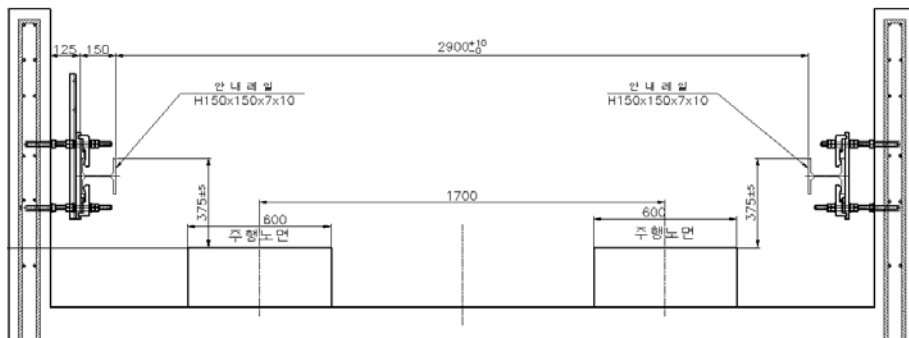


그림 9 안내레일 설치도

정밀 조정 후 좌우방향 흔들림(승차감)을 측정하였으나 기존대비 영향이 미미하였다. 이는 직선구간에서

는 승차감이 양호하지만 곡선구간에서 주고 안내륜이 좌측 또는 우측에 순간적으로 접촉을 하면서 주행하는 대차구조의 영향과 곡선구간에서 캔트(횡구배)를 시험선에서는 설치하지 않은 영향, 또는 주행노면의 불규칙성 및 이들의 복합적인 요인으로 예측되어 향후에는 주행노면의 요철을 정밀하게 사정 후 종합적인 재분석을 시행할 계획이다.

3. 결론

차량시스템의 장치들이 고장을 많이 발생 시켰으며 주로 출입문 고장이 61%, 보조전원장치 등이 주된 발생 장치들이다. 이에 대한 성능개선을 고려해서 설계하였으며 FMEA에 방법으로 고장 원인과 조치계획을 작성하여 설계 변경을 추진하여 많은 개선사항을 얻었다.

현재 유지보수는 일부 부품에 대한 고장이 발생되면 운행에 필요한 기본적인 수리 및 교체가 이루어지고 있다. 즉, 고장이 일어나면 고장에 대한 정확한 원인 분석으로 인하여 고장 발생원인 해결 및 고장에 대한 충분한 분석을 통해서 동일 고장에 대하여 또다시 발생 되지 않도록 조치를 취하여야 하며, 일부 부품에 대하여 교체를 하여야 할 때에 어떤 제품을 대체 부품으로 교체 되어야 하는지 판단이 필요할 경우 실험계획에 의한 교체부품의 선택도 이루어져야 한다. 또한 지속적인 신뢰성 성장을 이루기 위해 시험선에서 개선을 위한 연구를 수행하고 하여야 한다.

신호시스템의 통신기반열차제어 차상장치와 무선통신장치의 성능을 평가하였으며 정상적인 동작을 확인하였으며 향후에는 낙뢰 등에 의한 무선통신시스템에 대한 영향 및 데이터 수집을 수행할 계획이다. 또한, 선로구축물에 설치된 개발품에 대한 온도 민감도를 측정하여 실용화에 활용하고자 한다.

참고문헌

1. 이안호, 한석윤 외 다수 (2005년), “경량전철종합시스템엔지니어링기술개발 연구결과보고서”, 건설교통부
2. 이호용, 한석윤, 조홍식, 조봉관 (2007), “웹기반의 경량전철 유지보수 정보화시스템 개발방법론에 대한 연구”, 한국철도학회 07 춘계학술대회 논문집 , pp.722-729
3. 이호용, 류상환 외 12 (2007년), “무인경량전철시스템 RAMS 향상연구보고서”, 과학기술부