

# 한국형 틸팅열차의 틸팅 판토티그래프 동특성 측정시스템 개발

## Development of measuring system of dynamic characteristics for tilting pantograph on the Korean Tilting Train

목진용\*      김석원\*\*      김영국\*\*      김기환\*\*  
Mok, Jin Yong   Kim, Seog Won   Kim, Young Guk   Kim, Ki Hwan

---

### ABSTRACT

The current collection system, pantograph, is one of the important subsystems in electric train system, because of its fatal function and role of supplying power to the train system. Generally, the function of current collection system is evaluated by loss of contact rate between pantograph and contact wire in catenary by measuring arcs, or by statistical method of evaluating minimum mean contact force.

The Korean Tilting Train(TTX) has been manufactured by KRRI and Korean domestic companies and is preparing the trial running test of itself. In this paper, we introduce our successful achievement, measuring system and applied methods of dynamic characteristics for the tilting pantograph, developed of by our own technology.

---

## 1. 서 론

전기식 철도차량에서 차량의 주행, 제동에 필요한 전기에너지를 공급하는 판토티그래프 장치는 열차가 목표로 하는 최고속도로 주행할 때까지 어느 속도대역에서도 주행하는 열차의 진동이나 가선계 전차선 시설상태 등 외적 변수에 크게 영향을 받지 않고 가선계 전차선과 접촉을 유지하고 추종함으로써 이선(loss of contact)을 최소화하고 열차의 동력장치에 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 집전특성을 갖추어야 한다. 따라서 판토티그래프 장치가 이러한 집전특성을 안정적으로 유지하려면 기계요소들과 이들이 연결되어 이루어진 기계시스템인 판토티그래프 장치는 가선계 구조물인 전차선과 접촉하며 주행할 때 가선을 안정적으로 추종할 수 있도록 시스템의 동역학적 특성이 설계에 반영되고 구현되어야 한다.

국내 기술로 독자 개발한 한국형 틸팅열차 시제열차(TTX)는 이러한 전기식 철도차량으로 분류되는 EMU 방식의 동력배치 형태를 가진 열차로서, 편성의 전후 양끝에 동력제어차(Mcp Car)에 집전장치 즉, 판토티그래프 장치가 탑재되어 있다. 시제 틸팅열차는 본선 시운전 시험 및 열차 성능평가를 위하여 본선 시운전을 준비하는 단계에 있으며, 열차의 성능시험과 평가를 위한 종합 계측시스템 구축을 완료하여 본선 시운전시험을 준비하고 있다. 본 논문에서는 틸팅 판토티그래프의 집전성능을 과학적으로 측정, 분석할 수 있는 판토티그래프 동특성 측정시스템과 시스템 구축 과정에 개발, 적용된 기술을 소개하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 한국형 틸팅열차 판토티그래프의 개요

한국형 틸팅열차는 열차가 곡선구간을 주행하면서 차체를 능동적으로 틸팅 시킬 때 차체가 기울어짐으로 인해 열차 판토티그래프 집전판이 가선계 전차선과 접촉하는 횡방향 유효 접촉범위를 벗어나지 않도록

---

\* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : jymok@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5622 FAX : (031) 460-5649

\*\* 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

차체의 틸팅동작 중에 생기는 전차선 접촉점과의 상대 변위를 보정하기 위해 차체 틸팅으로 생기는 변위만큼 차체 틸팅방향과 반대방향으로 판토타그래프를 능동적으로 틸팅시키는 틸팅 판토타그래프를 적용한 점이 전동차나 다른 전기철도시스템과 매우 차별화 된 특징이다. 이러한 차이 때문에 틸팅열차 판토타그래프의 경우 기존 일반적인 형식의 판토타그래프와 다른 관점에서 수평 기울임 특성, 횡방향 거동 등 판토타그래프의 동적, 물리적 특성을 측정할 수 있는 동특성 측정시스템이 필요하다. 그림 1에는 한국형 틸팅열차의 외형을 보였으며, 표 1에 한국형 틸팅열차에 적용되는 틸팅 판토타그래프의 주요 성능사항과 특성을 나타내었다.

표 1 틸팅 판토타그래프의 주요 성능특성



그림 1 한국형 틸팅열차의 외형

Category	Classification	Specification
Static/Dynamic Characteristic	Static up-lifting force (N)	70 ± 10
	Mean contact force (N)	200
	Limit of up-lifting time (ses)	10
	Limit of folding time (sec)	4~6
	Max. tilting angle (°)	8
Contact loss	Loss of contact (%)	5
Arc duration	Limit of arc duration time (ms)	30
Temperature	Temperature of wear-strip (°C)	200
Contact area	Limit of lateral contact (mm)	± 200

## 2.2 판토타그래프 동특성 측정시스템의 구성

일반적으로 전기식 철도차량에서 판토타그래프 장치의 집전성능은 초도품 개발단계부터 가선계 전차선 설비와의 기계적 상호작용 특성과 전기적인 인터페이스 조건을 만족하는 최적의 집전성능을 가지도록 집전장치의 시스템 성능 요구사항을 설정하여 설계된다. 또한 판토타그래프 장치의 집전성능은 집전장치 집전판이 전차선과 물리적인 접촉상태를 유지하지 못하고 분리되는 시간의 누적합계 대비 열차의 전체 주행시간 비율로 정의되는 이선율의 기준범위 이내 여부로 평가하거나, 실제 집전판과 전차선의 동적 접촉력 크기를 측정하고 측정 접촉력으로부터 통계적 최소 평균접촉력을 구해 기준 값과 비교함으로써 열차 판토타그래프가 가선계 전차선과 상호작용하며 가지는 동적 접촉력 크기로서 집전성능을 평가한다. 전기철도의 집전품질 평가방법, 절차는 UIC 794-O, BS EN 50119 규격에 집전장치와 가선계 전차선 시설의 상호작용을 고려한 설계기준, 집전성능 측정 방법과 평가 기준 등이 상세하게 정의되어 있다.

한국형 틸팅열차의 판토타그래프 동특성 측정시스템의 경우 열차가 정차상태부터 최고속도로 주행할 때까지 앞의 표 1에 나타난 틸팅 판토타그래프가 요구된 항목별 성능특성을 갖추고 유지하는지 여부를 측정할 수 있어야 한다. 또한 측정시스템은 요구된 측정기능을 갖추면서 전기적으로 AC 25,000V 초고압, 대전류 전기에너지가 흐르는 전차선에 접촉할 때 판토타그래프 장치는 초 고압의 전위 레벨을 가지게 되므로 판토타그래프 몸체에 장착될 측정시스템은 차체와 전기적으로 완벽한 절연상태를 유지하며 차내의 데이터 수신장치 컴퓨터까지 측정된 신호를 왜곡 없이 정확히 전송할 수 있어야 한다.

이러한 요구조건을 만족하는 측정시스템을 개발하기 위하여 G7 고속전철 기술개발사업으로 개발된 한국형 고속열차 집전성능 계측시스템을 개발, 운영하는 과정에서 축적한 경험을 바탕으로 측정장비의 운용효율을 향상하고 데이터 분석 기능의 유용성을 높일 수 있는 시스템을 목표로 개발하였으며, 시스템 측정 항목과 센서 특성을 표 2에 나타내었다.

표 2 동특성 측정시스템의 측정 항목과 센서 특성

Measuring Function	Sensor Type	Measuring Range	Number
Contact Force	Non-inductive Strain Gauge	0 ~ 1,000 N	4
Acceleration	Accelerometer	0 ~ 196 m/s <sup>2</sup>	4
Aerodynamic Force	Load Cell	0 ~ 1,000 N	2
Tilting Angle	Tilt sensor	± 20°, 100 mV/° output	1
Temperature of wear-strip	Thermo-couple (K-Type)	0 ~ 1,000 °C	1

그림 2는 표 2의 성능사양을 만족하도록 개발한 틸팅 판토타그래프용 동특성 측정시스템의 구성도를 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 동특성 측정시스템은 판토타그래프 몸체에 장착된 물리량 측정센서 모듈과 신호처리 모듈, 그리고 열차의 계측실 내부에 설치된 데이터 수신모듈 등 크게 3개 서브시스템으로 구성하였다. 신호처리 모듈에서 실내 데이터 수신모듈까지 측정 데이터의 통신방법은 판토타그래프와 차체 간 25,000V 전위차를 절대 절연시키며 데이터의 정확한 송수신을 구현하기 위해 광섬유 케이블(Optic fiber cable)을 사용한 광 데이터 통신 기술을 적용하였다. 틸팅 판토타그래프의 집전판, 팬헤드 스프링, 상부암 등에서 측정된 접촉력, 온도, 가속도, 경사각 등 12개 채널의 아날로그 형태 물리량 데이터는 독립 배터리로 구동되는 신호처리 모듈에서 증폭, 절연 및 필터 처리되고 디지털 신호로 변환되어 광통신 케이블을 통해 차내의 데이터 수신모듈까지 송신되어 저장된다. 이 때 시스템의 데이터 통신과 연계되어 작동하는 데이터 저장 등 일련의 동작은 열차의 다른 측정 채널에서 수집되는 데이터들과 연계하여 분석하기가 용이하도록 시간 동기화, 측정 데이터의 저장 시작/정지 등을 열차의 통합 계측시스템으로부터 일괄 제어를 받아 동작하도록 구성하였다. 그림 3은 이와 같이 구성된 틸팅 판토타그래프 동특성 측정시스템이 한국형 틸팅열차의 동력 운전차(Mcp1 Car)에 장착된 모습을 나타낸 것이다.

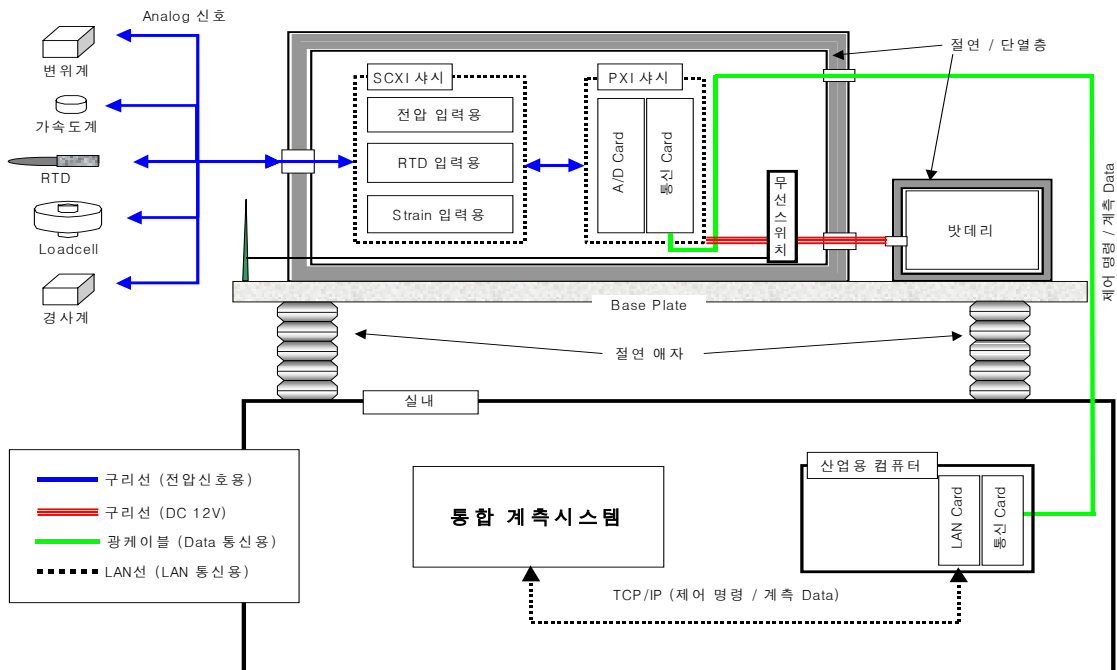


그림 2 틸팅 판토타그래프 동특성 측정시스템의 구성



(a)



(b)

그림 3 틸팅 판토틀래프 동특성 측정시스템의 설치 사진, (a) 전방 사진, (b) 후방 사진

## 2.3 동특성 측정시스템의 성능시험 및 측정 정밀도 보정

### 2.3.1 시스템의 사용환경 성능시험

앞의 2.1절에 설명된 측정 기능을 갖추도록 개발된 틸팅 판토틀래프의 동특성 측정시스템은 시스템의 사용환경 측면에서 열차의 지붕에 탑재되므로 야외에 노출되는 조건의 내후성과 내열성, 그리고 AC 25,000V 초고압 환경에서 동작해야 하는 절연내압 특성 등이 요구된다. 이러한 시스템 사용환경 측면의 요구조건에 대한 성능을 확인하기 위하여 개발이 완료된 시스템을 대상으로 공인시험기관에 시험을 의뢰하여 한국표준규격(KS)에 규정된 시험 방법과 절차에 따라 사용환경 열화시험과 절연내압 시험을 시행하였다. 사용환경 열화시험은 크게 정습도 온도변화 시험, 습도를 변화시키며 외기 온도변화에 대한 내성을 시험하는 온습도 싸이클 시험으로 구분하여 시험하도록 되어 있는데 시험방법과 절차는 KS C 0225와 KS C 0227에 정연하게 정의되어 있다. 아래 그림 4에 측정시스템에 대하여 시행한 정습도 온도변화 시험과 온습도 싸이클 시험의 조건을 나타내었다.

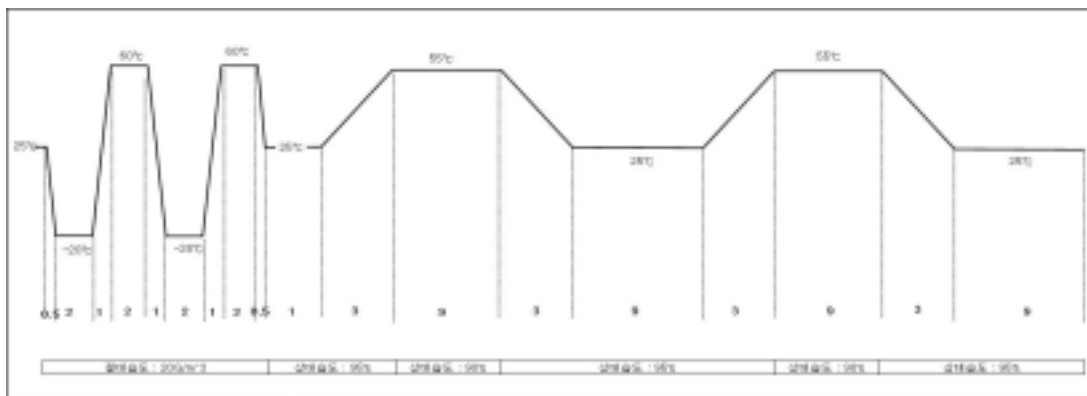


그림 4 사용환경 열화시험을 위한 정습도 및 온습도 싸이클 시험 조건

이와 같은 온습도 내후성 관점에서 시행한 시스템의 사용환경 열화시험 외에 측정시스템은 AC 25,000V 초고압 환경에서 동작하려면 전기적으로 충분한 절연내압 특성도 요구되므로 시스템의 구성모듈 중 판토틀래프에 장착될 신호처리 모듈 및 센서류를 실제 장착상태와 동일하게 구성하고 공인시험기관에 시험을 의뢰하여 AC 65,000V를 1분간 인가시키는 절연내압 시험을 시행하였다. 이러한 절연내압 시험의 방법과 절차는 KS C 3801 규격에 정해진 절차와 방법으로 시험하였고, 그 결과 충분한 절연내압 특성을 갖추었음을 확인하였다. 그림 5에 측정시스템에 대한 절연내압 시험의 결과와 해당 내용을 보였다.

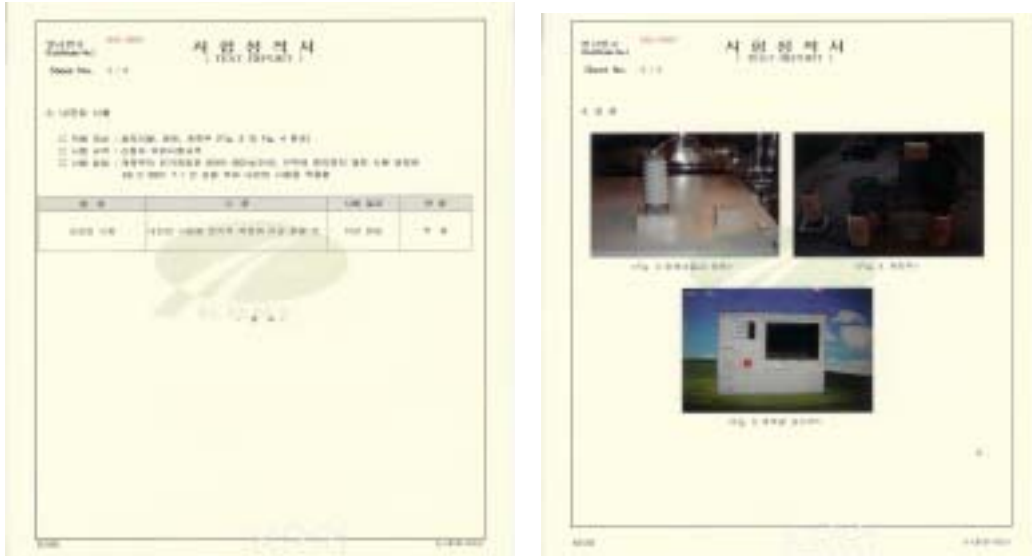


그림 5 측정시스템의 절연내압 특성시험 결과

### 2.3.2 시스템의 측정 정밀도 보정

앞의 2.1절에 설명된 성능을 목표로 개발된 틸팅 판토틀로그의 동특성 측정시스템에서 기본적으로 확인해야 할 시스템의 가장 중요한 측정성능은 열차가 주행하며 판토틀로그 장치가 가선계 전차선과 접촉할 때의 접촉력의 측정 성능과 시간 축에서 동적 접촉력 변화를 분석할 수 있는 데이터 후처리 기법이다. 측정 데이터의 후처리 기법은 한국형고속열차 개발 단계에서 독자 개발한 Lab View 기반의 분석 소프트웨어 프로그램과 분석 기법들을 활용하여 후처리 및 분석 성능을 향상, 확장시키면 본 시스템에 활용이 가능하다. 그러므로 틸팅 판토틀로그의 동특성 측정시스템 기능 중 물리량 측정모듈이 정확한 접촉력 측정 정밀도를 확보하여 유지하도록 측정 센서의 정밀도를 보정하고 확인하는 과정이 필요하였다.

본 시스템의 측정 대상인 틸팅 판토틀로그는 아래 그림 6에 보인 것처럼 집전판 팬헤드가 전후 방향 즉, 열차 진행방향으로 2열로 배치되어 있고 각 집전판은 좌우측 끝단이 스프링에 의해 팬헤드 프레임 구조물에 지지되므로 4개의 스프링이 집전판과 전차선 사이의 전체 접촉력을 분담하는 구조를 가진다. 따라서 정확한 접촉력 측정을 위해서는 팬헤드 스프링의 변형율로 부가된 접촉력을 측정하는 스트레인 게이지의 정밀도를 보정, 확인하는 절차가 필요하였으므로, 측정 대상인 팬헤드 스프링에 그림 7에 보인 바와 같이 측정용 스트레인 게이지를 부착, 설치하고 측정 신호의 정밀도 보정 작업을 시행하였다.

그림 7에 보인 것처럼 2개 팬헤드 스프링의 4개소에 부착한 스트레인 게이지 4개에 대하여 각각 4,500~100 kgf까지 12단계로 구분해 개별 채널별 측정값을 교정한 후 스프링이 완전히 조립된 팬 헤드 위에 하중을 인가하고 4개 채널의 측정값의 합력에 대하여 인가하중 대비 측정값을 비교 보정하였다. 그림 8에 조립된 팬헤드 위에 분동 추를 이용하여 하중을 인가한 상태를, 그림 9에 인가하중 대비 개별 센서 4개소에서 측정된 신호의 합력 값 보정 결과를 나타내었다.



그림 6 틸팅 판토틀로그 팬 헤드의 구조



그림 7 팬헤드 스프링의 스트레인 게이지 부착 상태





그림 8 분동 추를 이용한 하중인가 상태

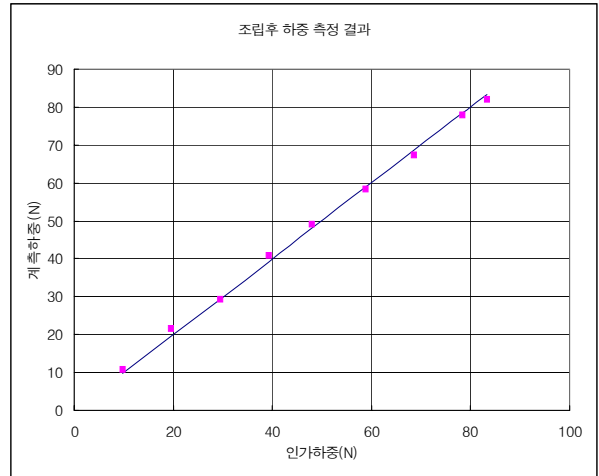


그림 9 인가하중 대비 측정신호 보정 결과

### 3. 향후 계획

한국형 틸팅열차 시제열차는 현재 충북 오송기지에서 차량시스템과 종합 계측시스템의 성능을 정비, 보정하면서 충북선 전철화 구간에서 본선시운전 시험을 추진중에 있다. 향후 자체 개발한 측정시스템을 활용하여 한국형 틸팅열차의 본선 시운전 시험항목인 틸팅 판토티그래프의 집전성능과 동특성 측정시험을 추진함으로써 국내 기술로 개발한 틸팅열차와 집전장치인 판토티그래프의 집전성능을 다양한 관점에서 측정, 분석할 계획이다. 이러한 시험평가 연구를 통해 본 연구에 소개한 판토티그래프 동특성 측정시스템 개발 기술은 전기철도 분야의 계측 기법 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 철도기술개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 연구에 도움을 주신 관계자 여러분들의 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 한국철도기술연구원, “열차시험 및 성능평가 기술개발” 연차보고서, 2006.
2. 한국철도기술연구원, “G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 최종보고서”, 2002.
3. 목진용 외, “한국형 고속전철용 판토티그래프의 거동특성과 열차 속도와의 상관관계와 경향”, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2003.
4. M. Ikeda and T. Usuda, “Study on the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire”, RTRI Report Vol. 14, No. 6, 2000.
5. Korea High Speed Rail, “Qualification Test Procedure Train-set Pantograph Test”, 2001.
6. BS EN 50119, European Committee For Electro-technical Standardization