

350km/h 본선 주행시험을 통한 한국형 고속열차 판토그래프의 접촉력 특성 평가 연구

A Study on the Evaluation of Dynamic Characteristics of the Pantograph for the Korean High-Speed Train through 350km/h Trial Running Test

목진용[†] · 이희성^{*}

Jin-Yong Mok · Hi-Sung Lee

Abstract

The Korean High-Speed Train(HSR 350x) had been developed by through 'G7-R&D project' in 1996-2002, and has been testing and evaluating its reliability on the high-speed line until now. A number of core equipments designed and developed by using domestic technologies were boarded on the HSR 350x. In order to verify the performance of HSR 350x and core equipments such as traction system, brake system and pantograph, sophisticated testing and evaluating procedures should be considered and applied. In this paper, the tested and analysed results about the dynamic characteristics of HSR 350x pantograph are introduced in a view point of the mean contact force and its variation trend, criterion of current collection, and up-lifting of contact wire when the HSR 350x running up to 350 km/h. Through the test and evaluation, we verified that HSR 350x pantograph had an excellent current collection performance and good dynamic characteristics as it had been designed.

Keywords : HSR-350x(한국형 고속열차), Pantograph(판토그래프 ; 집전장치), Contact Wire(전차선), Catenary System(가선계), Contact Force(접촉력), Current Collection Performance(집전성능), Static Force(정적압상력)

1. 서론

2004년 4월 경부고속철도의 개통은 한국의 철도 역사를 새로운 장으로 써야할 만큼 철도기술의 변혁과 철도교통 서비스의 혁신을 의미하는 중대한 계기가 되었다. 더불어 같은 해인 2004년 12월 16일에는 1996년부터 고속철도 핵심기술의 자립을 목표로 추진해 온 G7 고속전철기술개발 사업의 결과인 한국형 고속열차가 목표한 최고속도 350 km/h를 넘는 352.4km/h 주행 시험에 성공함으로써 우리나라도 프랑스, 독일, 일본 등 G7 선진 고속철도 기술 보유국 수준까지 독자적인 고속철도 기술을 확보했음을 국내외에 입증해 보였다.

가선에서 전기에너지를 받아 동력원으로 이용하는 전기 철도시스템은 열차가 주행하며 판토그래프가 전차선과 접

촉할 때 얼마나 안정적으로 가선을 추종하며 집전하는가에 따라 견인·제동 등 주행 성능이 좌우되며, 특히 80~120 km/h로 운행하는 전동차에 비해 250~350km/h까지 고속 주행하는 고속열차에 있어서 집전특성은 열차의 주행 성능에 더 큰 영향을 준다.

따라서 지금까지 열차의 집전성능 향상기술은 고속철도 시스템의 속도향상을 위한 필수 핵심기술 중의 하나로 간주되어 왔으며, 국내외 고속철도 분야에서는 가선계와 판토그래프의 상호 작용특성을 모델링하고 유한차분법(FDM)이나 유한요소법(FEM) 등 근사해법을 이용해 동역학적으로 해석을 시도하거나 실제로 고속열차의 판토그래프가 가진 동적 특성을 측정하여 그 경향을 분석하고 최적화하기 위한 연구들이 다양하게 이루어져 왔다[1-4].

본 연구에서는 한국형 고속열차의 최고속도 350km/h본선 시운전시험을 통해 측정된 결과 중 판토그래프가 전차선과 상호 작용하는 동특성과 인터페이스 특성을 분석하여 판토그래프의 집전성능을 평가하였다.

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 책임연구원

E-mail : jymok@krrl.re.kr

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

^{*} 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량공학과, 조교수

2. 한국형 고속열차 집전장치의 특성 시험

2.1 한국형 고속열차 집전장치의 개요

연구에 활용된 한국형 고속열차는 Fig. 1과 같이 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량의 총 7량으로 편성되어 있고, 25 kV 전차선으로부터 열차에 전원을 공급하는 판토틀라프는 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 2조가 탑재되어 있으며, 열차가 정상적으로 운행할 때는 진행 방향을 기준으로 후부 동력차의 판토틀라프 1조만을 상승시켜 전차선과 접촉하면서 열차의 주행에 필요한 전기 동력을 공급한다.

따라서 2조 이상 집전장치를 동시에 가선에 접촉시켜 집전하며 저속으로 운행하는 전동차 등 철도시스템에 비해, 고속 운행하면서 2조 중 1개 집전장치만 전차선과 접촉하며 동력을 공급하는 고속열차 집전장치는 더 높은 신뢰도와 가선 추종성이 요구되며, 이런 이유로 인해 고속열차에서 판토틀라프의 집전품질과 동적 특성의 평가는 차량시스템의 전체적인 주행성능과 최고속도 성능의 평가에 있어서 매우 중요한 핵심 기술이다.

경부고속철도 가선계는 Fig. 2와 같이 판토틀라프가 접촉하며 전원을 공급받는 전차선, 그 하중을 지지하는 조가선 및 드로퍼, 열차 진행방향으로 전차선이 받는 힘을 지지하고 완충하는 가동 브래킷, 전차선 하중을 분담하며 상하 진동과 밀어올림 충격을 완충시키는 스테디 암(steady arm), 그리고 이들을 지지하는 전주로 구성되어 있다. Fig. 3에 보

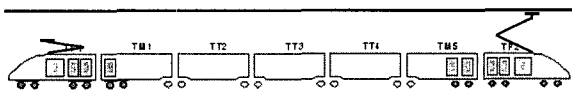


Fig. 1. Arrangement of pantograph in HSR 350x train-set

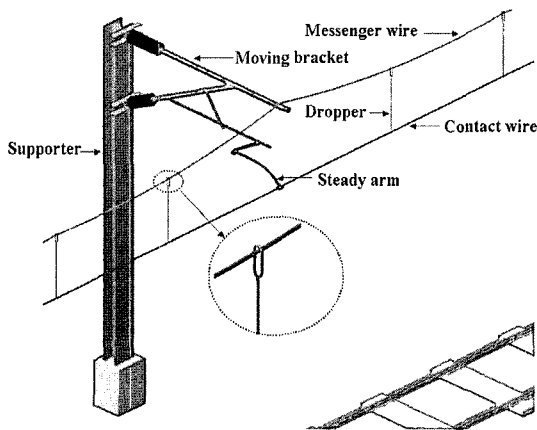


Fig. 2. Schematic view of catenary system in high-speed line

인 것처럼 판토틀라프는 전차선과 접촉력을 부담하는 집전판과 1차 스프링으로 연결된 팬헤드, 팬헤드가 전차선과 접촉하도록 압상력을 전달하는 상/하부 암, 암과 팬헤드를 연결하는 플린저와 2차 스프링, 그리고 정적압상력을 발생하는 주 스프링으로 구성되며 Cross Bar 위에는 평판 날개형의 양력조절판이 있어 열차 주행 중 판토틀라프를 밀어 올리는 공기양력 특성을 조절하도록 되어 있다. 또한 판토틀라프는 Fig. 4와 같이 스프링-질량-댐퍼(spring-mass-damper) 시스템으로 모델링한 시뮬레이션을 통해 설계 및 시작품이 제작되었고 시작품 단계에서 풍동시험을 통해 성능이 검증된 판토틀라프가 한국형 고속열차에 탑재되었다[5,11].

열차에는 판토틀라프의 거동특성을 계측하기 위한 팬헤드 전단력, 가속도, 온도 등 물리량을 14채널로 구분하여 측정하는 계측시스템이 구축되어 있으며, 물리량 측정용 센서는 전차선-집전판 간 팬헤드 접촉력을 측정하는 Load Cell은 팬헤드와 Cross Bar가 연결되는 좌/우 1차 Spring 지지부에, 가속도계는 팬헤드를 연결하는 좌/우 빔 아래와 Plunger

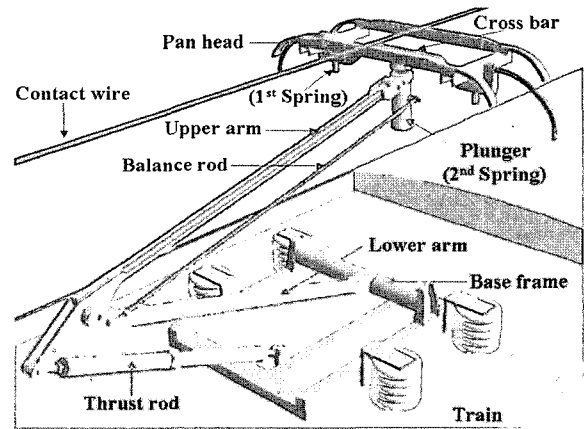
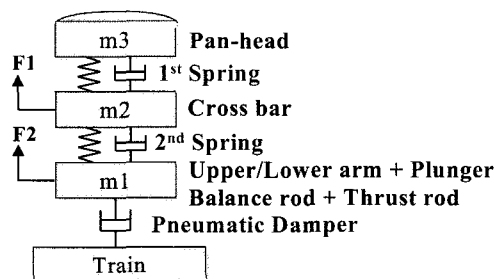


Fig. 3. Schematic view of pantograph in HSR 350x



F1: Aero-dynamic force
F2: Static Up-lifting force

Fig. 4. Applied spring-mass-damper model of pantograph

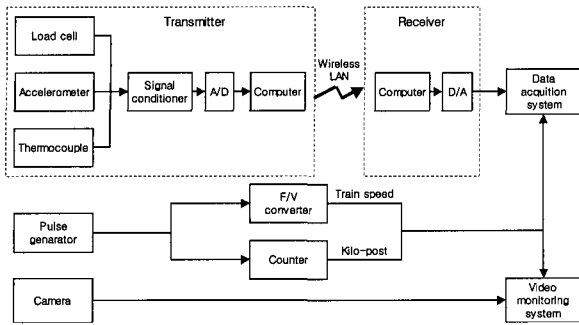


Fig. 5. Schematic dia

상부에, 집전판의 온도를 측정하는 Thermo-couple은 집전판 하단에 각각 설치되어 있으며 개략 구성도를 Fig. 5에 보였다.

Fig. 5에 보인 데이터 수집·전송부는 판토품에 설치한 센서에서 측정된 물리량 신호를 디지털 신호로 변환하여 무선 랜 통신 장치를 통해 차내에 설치된 수신부 컴퓨터까지 측정 데이터를 유/무선 송신하며, 수신부 컴퓨터는 수신한 데이터를 아날로그 신호로 변환하여 최종 저장 모듈로 보내져 저장이 된다.

또한 차축의 펄스 발생기로부터 받은 차축회전 펄스는 열차속도와 주행거리를 연산할 수 있도록 데이터 저장모듈로 보내져 판토품 물리량 측정데이터와 함께 저장되며, 이 차축 회전속도 데이터는 Lab View기반의 데이터 처리·분석 프로그램을 이용하여 채널별 특성을 분석하는데 이용하였다[6,7].

2.2 최고속도 주행시험을 위한 사전조치

2.2.1 양력조절판 및 정적압상력 조정

한국형 고속열차 판토품은 개발단계에 풍동시험을 통해 양력특성을 측정하였으며, Fig. 6에 풍동시험을 통해 측정된 양력조절판 형식별 순 양력 특성을 보였다. 기호 (-●-)은 양력판 폭 40mm, (-■-)는 폭 60mm, (-▲-)은 100mm, (-▼-)는 폭 120mm 양력판의 특성을 나타내며, 풍동시험 결과를 토대로 350km/h까지 평균 접촉력을 고속선 기준 내로 유지시킬 수 있는 적합한 양력판으로서 폭 100mm를 개발 단계에 선정하여 적용하였다. 그러나 풍동시험 결과와 다르게 시운전 시험 결과 실제 순 양력과 정적압상력 70N의 합력인 평균접촉력이 Fig. 7에서 보인 바와 같이 약 270km/h 이상에서 고속선 기준인 200N을 초과하며, 이 차이는 풍동시험의 경우 길이 방향으로 0-350km/h까지 층류(Laminar Flow) 공기를 강제 통과시키며 양력 특성을 시험한 조건인 반면, 실제 달리는 열차는 개활지 뿐 아니라 빈번하게 터널을 진

입, 진출하며 판토품에 난류(Turbulent Flow)흐름의 공기 유동으로 인한 양력 특성이 다르게 작용하는 환경이 주된 이유인 것으로 판단된다. 속도향상 시험은 폭 100mm의 양력판을 장착한 상태로는 300km/h 이상 속도에서 평균접촉력이 기준을 초과하기 때문에 폭 100mm의 양력판보다 작은 양력을 갖는 양력판으로 교체해야 했다. Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼 폭 60mm 양력판의 경우에도 약 280km/h 이상에서 평균압상력이 고속선 기준치를 초과하기 때문에 폭 40mm의 양력판으로 교체하여 300km/h 이상 속도에서 시운전시험을 할 수 있도록 양력을 조정하였다[5,6].

Fig. 8은 폭 40mm 양력판으로 교체된 후에 300km/h의 속도에 대한 시운전시험에서 측정된 평균접촉력으로부터 구해진 경향곡선을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보인 바와 같이 40mm 양력판으로 조정된 경우가 당초 양력판(W=100mm) 적용 시보다 270km/h 이상에서 양력이 약 30N 낮아지는 경

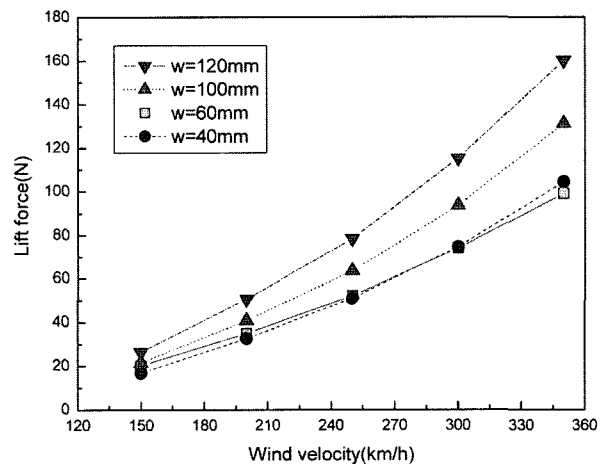


Fig. 6. Experimental results of aerodynamic force

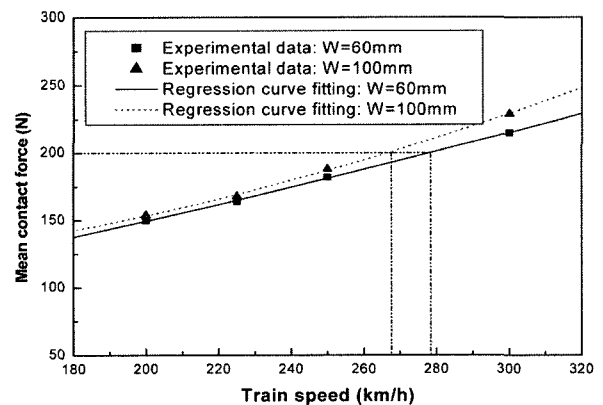


Fig. 7. Mean contact forces according to variations of plate width

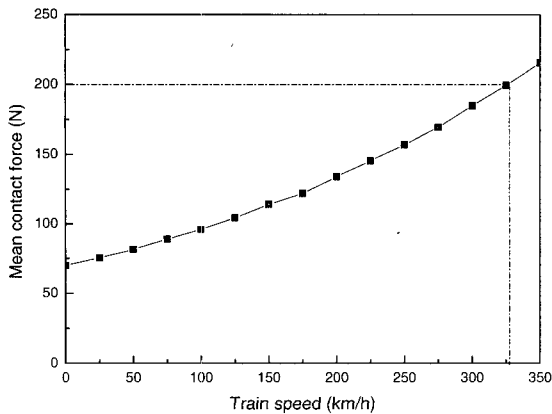


Fig. 8. Mean contact force for plate width 40 mm

향을 보임을 알 수 있다.

그러나 양력판을 조정하였음에도 불구하고 Fig. 8에 보인 것과 같이 폭 40mm 양력판을 적용한 경우에도 평균접촉력이 속도 약 330km/h 이상 속도부터는 고속선 기준인 200N에 근접하였다. 이는 양력판만의 조정으로는 평균접촉력 기준을 만족시킬 수 없음을 의미하기 때문에 정적압상력의 조정이 필요하다. 따라서 정적압상력을 기준(70±10 N) 범위 내에서 62N으로 하향 조정하여 성공적으로 340, 350km/h 주행시험을 수행하였으며, 열차가 350km/h로 주행할 때의 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

2.2.2 전차선 높이상승 제한장치 조정

고속철도 가선계는 열차가 통과하며 판토틀라프가 전차선을 밀어 올릴 때 적절한 접촉력을 유지하도록 최대 200mm까지 탄성 거동하는 충격흡수 구조를 갖추었으며 열차는 안전을 위해 전차선 상승 한계(레일에서 5,280mm) 이하로 판토틀라프의 상승을 제한하는 높이상승 제한장치(HSL stoping device)를 탑재하고 있다.

350km/h 주행시험에 앞서 열차의 높이상승제한장치를 전차선 상승 한계보다 40mm 낮은 5,240mm로 조정하여 주행 시험 중 전차선의 과도한 밀어올림을 예방하였다[8].

2.3 최고속도 350km/h까지 판토틀라프의 동적 특성

2.3.1 집전장치의 최대 접촉력 특성

전기철도시스템에서 전차선에 대한 판토틀라프의 최대접촉력은 EN 50119의 경우 250km/h 이상 고속열차에는 최대 350N까지로 정하며, 프랑스의 고속철도 운영기관인 SNCF는 300N 이하이면 양호한 수준으로 판단한다[9,10].

한국형 고속열차의 판토틀라프에 대하여 열차가 최고350

km/h 속도로 주행할 때 측정된 실제 최대 접촉력은 Fig. 9와 Table 1에 보인 분석 결과와 같이 300N 이하로 양호함을 알 수 있다.

2.3.2 최고속도 352km/h까지 평균접촉력 특성

Fig. 10은 한국형 고속열차가 352km/h로 주행할 때까지 측정된 평균접촉력과 측정 데이터로부터 추정된 회귀곡선을 나타낸 것이다. 압상력과 열차의 주행속도에 따라서 판토틀라프의 평균접촉력이 가지는 변화 특성은 회귀곡선으로부터 알 수 있다.

Fig. 10에 나타낸 회귀 곡선의 경향을 살펴보면 한국형 고속열차 판토틀라프의 평균접촉력 특성은 열차의 속도에 2차 함수 관계를 가지며 증가하는 경향을 가지며, 이 때 열차속도에 대한 판토틀라프의 평균접촉력은 식 (1)과 같이 $9.04784 \times 10^{-4} [N/(km/h)^2]$ 의 양력 특성 계수를 가지는 실험적 관계식으로 표현할 수 있다.

$$F_{mean} = F_s + 9.04784 \times 10^{-4} V^2 \quad (1)$$

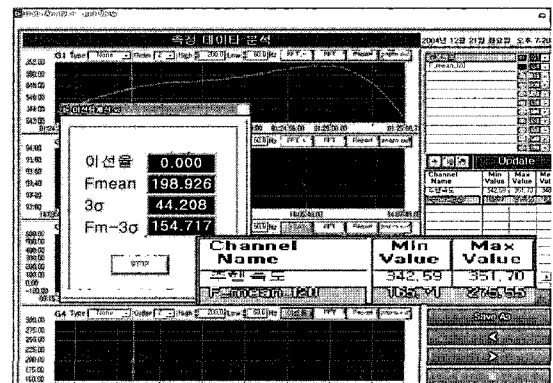


Fig. 9. Analysed experimental result for max. contact force

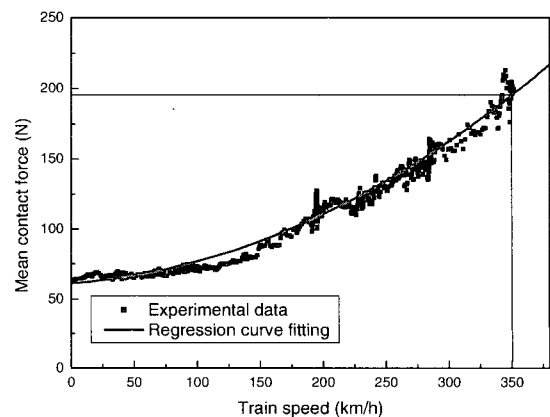


Fig. 10. Mean contact force between pantograph and catenary

여기서, F_{mean} = 평균접촉력(N)

F_s = 정적압상력(N)

V = 열차 주행속도(km/h)

2.3.3 가선-집전장치 간 이선티성 및 집전품질

고속철도시스템에서 판토티그래프의 집전품질을 평가하는 방법은 유럽 EN규격과 UIC Code는 2가지 방법 중 1가지를 적용하도록 규정하고 있다. 첫째 방법은 가선-집전장치 간 접촉력을 측정하고 평균접촉력과 표준편차의 3배에 대한 차이 즉, $F_{mean}-3\sigma$ 값이 기준 값보다 크면 집전품질이 양호하다고 판단한다. 주행속도 230~300km/h인 고속열차에 대하여 기준 값은 EN 규격이나 UIC Code는 0(Positive)을 적용하고 있으나, SNCF의 TGV나 스페인의 RENFE 고속열차의 경우 EN/UIC보다 엄격한 기준 값인 40N을 적용하고 있다.

판토티그래프의 동특성 관점에서 누적 이선티시간과 열차 주행시간의 비율로 집전품질을 평가하는 두 번째 방법은 접촉력 측정이 기술적으로 어려운 경우에 적용할 수 있는 대안으로서 전차선으로부터 이선티가 생길 때 보이는 전기적 아크(Arc)를 측정, 평가하는 방법으로 열차가 받는 전류가 정격의 30%이상(243 A)일 때 10ms 이상 지속된 아크의 누적시간과 집전시간의 비율이 1% 이하인지 평가하는 방법이다 [9,10].

한국형 고속열차의 경우 전차선과 판토티그래프 사이의 실제 접촉력을 측정할 수 있는 계측시스템과 더불어 평균접촉력, 표준편차 등 측정 데이터의 통계처리, 분석이 가능한 데이터 후처리/분석 체계를 갖추었으므로 유럽규격 EN-50119에서 정의하는 접촉력 평가법을 적용하여 판토티그래프의 이선티특성과 집전품을 평가하였다. 항목별로 분석한 결과는 Fig. 9와 같았으며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1에 보인 것처럼 열차가 352km/h로 주행할 때 $F_{mean}-3\sigma$ 값은 154.7 N으로 평가되었고 한국형 고속열차 판토티그래프는 순간적 이선티와 10msec 이내의 미세한 아크는 발생하나 전체적인 집전품질은 국제규격 기준에서 정한 양호한 수준의 집전품질과 가선 추종성능을 갖춘 것으로 평가되었다.

2.4 최고속도 350km/h까지 동적 인터페이스 특성

2.4.1 집전장치의 전차선 밀어올림 특성

(1) 전차선 밀어올림 량의 측정·분석

열차가 최고 속도로 전차선 지지점을 통과할 때 전차선 밀어올림 량의 측정은 Fig. 11에 보인 바와 같이 한국형 고속열차의 지붕에 설치된 모니터링 카메라로 전차선 밀어올림 량과 접촉상태를 녹화하고 30 frames/sec까지 상세화면

을 측정, 분석하는 방법과 열차가 통과하는 선로변에 500 frames/sec 이상의 고속 촬영용 카메라(“Phantom V-7.0”)를 설치하여 열차가 통과할 때 전차선의 밀어올림 량을 측정하는 2가지 방법을 병행하였다.

(2) 전차선 밀어올림 량, 접촉 편위 측정 결과

열차가 300~350km/h로 주행할 때 차량의 카메라로 측정된 전차선 밀어올림 량의 속도별 증가 경향을 Fig. 12에 나타내었으며, 350km/h까지 최대 압상량은 +145mm로서 최대 200mm 이내인 고속선 기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

또한 판토티그래프의 집전판과 전차선이 가진 최대 접촉 폭

Table 1. Statistical data for the pantograph on HSR 350x

Item	Mean contact force (F _{mean} , N)	Max. contact force (F _{max} , N)	Min. contact force (F _{min} , N)	Current collection criterion (F _{mean} -3σ, N)
Train speed (km/h)	198.9	275.6	165.7	154.7

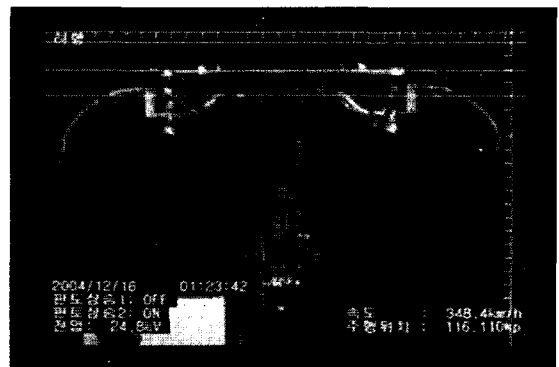


Fig. 11. Pantograph monitoring data in the HSR 350x

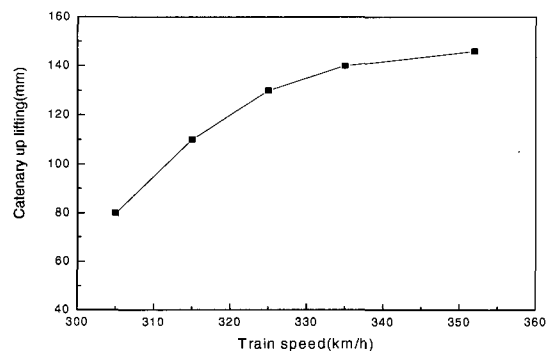


Fig. 12. Experimental result for up-lift of contact wire

은 최고 352km/h까지 주행할 때 집전판의 중심선으로부터 좌우 230mm 이내 접촉 범위를 보였으며 집전판 폭은 좌우 300mm 범위까지 안정적인 집전 범위를 갖는 구조이므로 한계 집전범위까지 좌우로 70mm의 추가 여유를 갖고 접촉 하였으므로 판토틀라프는 최고 350km/h 속도까지 전차선과 가지는 횡 방향 접촉 특성과 인터페이스 성능 면에서 양호한 특성을 가진 것으로 평가되었다.

3. 결론

본 연구는 경부고속철도 선로에서 한국형 고속열차의 최고 속도 352km/h까지 본선 주행시험을 통해 취득한 결과를 기초로 판토틀라프가 가선계 전차선과 상호 작용할 때 이선 특성을 포함한 집전품질과 동적 인터페이스 특성을 분석, 평가하였으며, 연구를 통해서 다음과 같은 결과와 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 한국형 고속열차 판토틀라프의 동특성은 열차속도 150 km/h부터 350km/h까지 전차선과의 접촉력을 결정하는 공력특성을 조정할 경우에 150km/h 이상 속도에서 평균접촉력과 최대접촉력을 일정 범위 내에서 제어할 수 있으며, 실제 양력조절판의 특성을 조정한 결과 열차속도 350km/h에서 판토틀라프의 평균접촉력을 일정량 낮추는 동적 특성 제어가 가능한 것으로 판단되었다.
- (2) 고속열차용 판토틀라프에 일반적으로 적용되는 정적압상력 성분도 기준범위(70±10 N)내에서 조정할 수 있고 340 ~ 350km/h 속도까지 판토틀라프의 가선 추종성능을 크게 저하시키지 않으면서도 평균접촉력 특성을 제어할 수 있음을 입증하였다. 연구를 통해 실험적으로 규명한 이 특성들은 판토틀라프의 성능최적화와 능동제어 연구 분야에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 한국형 고속열차 판토틀라프는 최고속도 350km/h로 주행하며 전차선과 상호 작용할 때의 최대접촉력과 평균접촉력, 이선특성 등 동특성 관점의 집전품질 성능과 전차선 밀어올림 량, 접촉 편위 등 구조물과 인터페이스 특성이 국제규격 수준 이상으로 양호함을 확인하였다.

후기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 연구결과 중 일부이며, 도움을 주신 한국철도공사(철도청)와 한국철도시설공단 관계자의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Wu, T. X., "Dynamic stiffness of a railway overhead Wire system and it's effect on pantograph-catenary system Dynamics", Journal of Sound and Vibration, Vol.219 No.3, pp.483-502, 1999
2. 허신, 경진호 송달호, 김정수, 조용현, "고속 집전계의 동적 수치 모의해석 프로그램 연구", 한국철도학회논문집/제5권/제1호, 2002, pp.10-17
3. Collina, A., Bruni, S., "Numerical Simulation of Pantograph-Overhead Equipment Interaction", J. of Vehicle System Dynamics, Vol.38, No.4, pp.261-291, 2002.
4. 이시우, 김정수, 조용현, 최강윤, "주행 중 발생하는 고속전철 집전계 신호의 특성", 한국철도학회논문집/제7권/제3호, 2004, pp.232-238
5. 한국생산기술연구원, "고속전철 판토틀라프 개발 2단계 2차년도 연차보고서(00-II-2-1-10)", 2001.
6. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 최종보고서(01-II-1-0-1)", 2002.
7. 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.
8. Korea High Speed Rail, "Qualification Test Procedure Train-set Pantograph Test (KTX)", 2001.
9. BS EN-50119 pp.15-16, 42, European Committee For Electro technical Standardization, BSi, 2001
10. UIC Code 794 O, pp.8 ~ 11, Pantograph-Overhead line interaction on the European high-speed network, 1996
11. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발" 연차보고서, 2002.
12. RTRI(일본철도기술종합연구소), "Gasendo-S1 Manual", 1994.