

한국형 고속열차의 350km/h 본선 주행시험을 통해 본 고속열차용 팬터그래프의 이선 특성과 동적 특성 고찰

Study on the current collection & vibration characteristics of the KHST's pantograph through trial running test up to 350km/h

목진용* · 박찬경** · 박춘수** · 김기환**

Jin-Yong Mok* · Chan-Kyoung Park** · Choon-Soo Park** · Ki-Hwan, Kim**

Key Words : Pantograph(집전장치), Catenary System(가선계), Contact Wire(전차선, 접촉선), KHST(Korean High Speed Train, 한국형 고속전철), Mean Contact Force(평균접촉력)

ABSTRACT

The KHST(Korean High Speed Train) which had been developed by through "G7-R&D project" has succeeded trial running test up to 350km/h on the Kyoung-Bu High Speed Track in December 16th, 2004. In order to evaluate the function and characteristics of KHST, various experimental conditions have been considered and conducted.

In this paper, measured current collection characteristics and dynamic behaviors of KHST's pantograph are analysed over 300 to 350km/h in running speed of KHST. A measuring system developed and installed on the KHST for measuring the performance and mechanical characteristics of the KHST's pantograph was used for this trial running test and eventually, we proved that KHST has a remarkable and stable current collection characteristics as it had been designed.

철도 기술개발에 성공하였음을 객관적이고 과학적인 주행시험 결과로서 국·내외에 입증해 보였다.

본 연구에서는 경부고속철도 선로에서 한국형 고속열차의 최고속도 352.4km/h 주행시험을 통해 실제 측정된 전차선과 팬터그래프의 접촉력, 이선특성과 전차선과의 상호작용 특성 등 한국형 고속열차의 동적특성에 대하여 설계·개발단계의 성능예측 시뮬레이션 값과 비교·평가한 연구결과를 제시하였다.

1. 서 론

가선(Catenary)으로부터 전기에너지를 받아 동력원으로 이용하는 전기철도 시스템은 전차선과 접촉, 추종하는 집전장치(Pantograph)가 얼마나 전차선과 이선(Loss of Contact)을 최소화하고 안정적인 집전품질(Current Collection Criterion)을 유지하는가가 열차의 주행성능을 크게 좌우하며, 최고 속도가 80~120km/h 대역인 통근형 전동차와 같은 저속 전기철도 시스템에 비해 200km/h 이상 350km/h까지 고속 주행하는 고속철도의 주행안정성과 속도성능은 집전품질에 따라 더 큰 영향을 받는다.

2004년 12월 16일, 지난 '96년부터 G7고속전철기술개발사업을 통해 고속철도 기술의 완전자립을 목표로 개발한 한국형 고속열차(KHST ; Korean High-Speed Train)가 최고속도 350km/h를 넘어 시속 352.4km를 돌파함으로써 프랑스, 독일, 일본 등 G7 선진 철도국 수준까지 고속철도 기술을 확보, 자립하려는 고속철도기술개발사업이 목표를 달성하고 궁극적으로는 고속

2. 한국형 고속열차의 350km/h 주행시험 결과

2.1 한국형 고속열차 집전장치의 개요

한국형 고속열차는 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량 등 총 7량편성 열차로서 가선계 전차선으로부터 25kV의 전원을 공급받는 판토그래프(pantograph)가 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 2조가 설치되어 있으며, 정상운행 모드로 운행할 때 열차 진행방향의 후부 동력차 판토그래프 1조만을 상승시켜 전차선에 접촉시킴으로서 주행 중 필요한 전력을 집전하는 방식을 적용하고 있다. (Fig. 1)

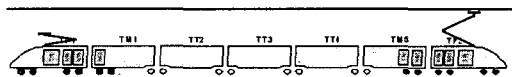


Fig. 1 Arrangement of Pantograph in KHST Train-Set

* 한국철도기술연구원, 정회원
E-mail : jymok@krii.re.kr
Tel : (031) 460-5622, Fax : (031) 460-5649

** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

따라서 다수의 집전장치로 가선과 접촉, 집전하는 전동차나 동력분산식 고속전철에 비해, 1조만 전차선과 접촉시켜 집전하는 KHST 집전장치의 성능은 더 높은 신뢰도와 안정적 가선 추중성 등 집전품질이 요구되며, 열차 성능평가의 주요 항목이자 시험평가 대상이 된다.

경부고속철도 가선계와 KHST열차 판토품의 접촉력 계측은 한국형 고속열차용 계측시스템을 활용하였으며, 전차선과 집전판(Pan head) 사이의 작용력 즉, 접촉력(Contact Force) 측정은 집전판을 지지하는 좌·우빔의 작용력을 Load Cell을 이용 500Hz~2KHz로 Sampling하였으며 데이터 분석은 Lab View_6.0i 기반의 자체 개발한 프로그램을 이용, 후처리 통계·연산 처리하였다[1-5].

2.2 최고속도 350km/h 주행시험 대비 사전조치

(1) 정적 압상력(Static Up-Lifting Force) 조정

KHST열차의 350km/h 증속시험 추진 과정에서 최초 300km/h 주행시험에 성공한 후, 330km/h 주행시험부터 팬터그래프와 전차선 간 평균접촉력이 허용기준 200N보다 초과 예측되어 스프링에 의한 정적압상력(Static Up-Lifting Force, 기준; $70 \pm 10N$)을 기준 값보다 8N 낮은 62N으로 하향 조정하고 350km/h 주행시험을 실시하였다[6].

(2) 높이상승제한장치(HSL Stopping Dev.) 조정

경부고속철도 전차선의 구조는 열차통과 시 최대 200mm 까지 상승 가능하며, KHST열차는 레일면에서 5,280mm 까지 판토품상승을 제한하는 높이상승 제한장치가 설비되었으나, 열차가 최고속도 350km/h로 통과 시 전차선 최대 상승높이보다 더 밀어 올리지 못하도록 최대상승 높이보다 40mm 낮은 위치에서 강제 구속되도록 안전 조치로서 조정하고 350km/h 주행시험을 실시하였다.

2.3 속도 350km/h 주행 중 집전성능 측정결과

(1) 전차선-팬터그래프 사이 최대 접촉력 특성

200km/h 이상 고속철도에서 전차선-팬터그래프 간 최대 접촉력은 국제규격인 EN 50119의 경우 최대 350N까지를 설계기준으로 정하며, 프랑스 고속철도 SNCF는 최대 접촉력을 300N 이하면 양호한 수준으로 판단하고 있다.[7].

설계·개발단계에 KHST열차의 330~350 km/h 주행 시 최대접촉력을 예측하고자 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 2와 같이 340km/h부터는 300N을 초과할 것으로 예측되었으나, 실제 주행시험을 통해 측정·분석된 통계적 최대접촉력은 Fig. 3과 같이 275.6N이었으며, 이는 시뮬레이션 조건이 양력조절판 형식은 W100, 정적압상력 70N 조건인 반면, 실제 주행시험은 양력판 W40, 정적압상력 62N으로

조정된 조건 차이로 인해 350km/h 주행 시 통계 최대 접촉력 값이 300N 이하였던 것으로 판단되었다[8], [9].

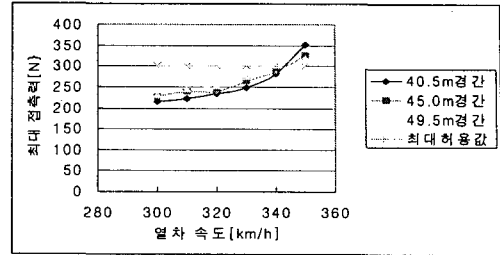


Fig. 2 Simulation Result for Max. Contact Force

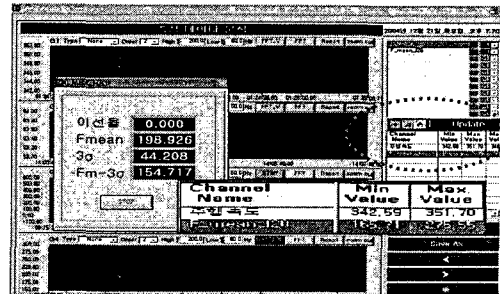


Fig. 3 Experimental Result for Max. Contact Force

(2) 전차선-팬터그래프 사이 평균접촉력 특성

KHST열차가 최고속도 352km/h까지 주행할 때 측정된 전차선과 평균접촉력은 Fig. 3, 5와 같이 14초 평균 198.9N이었으며, 이는 설계·개발단계에 시뮬레이션으로 예측한 값보다 8~9N 낮은 값이며 양력판 조정, 정적압상력 조정의 영향인 것으로 판단되었다.(Fig. 3~5)

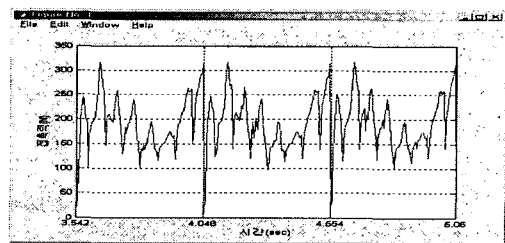


Fig. 4 Simulated Mean Contact Force at 350 km/h

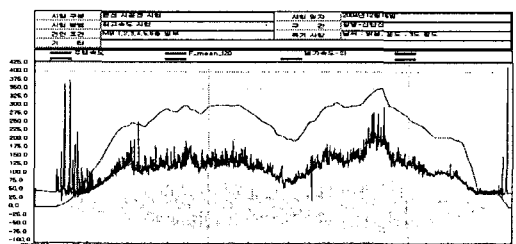


Fig. 5 Experimental Mean Contact Force up to 350 km/h

(3) 최고 350km/h까지 평균접촉력 변화 경향

KHST열차는 330km/h 증속주행시험을 시작하면서부터 350km/h까지 열차 주행 중 공기양력에 따른 가선접촉력 특성을 200N 이하로 조정하기 위해 앞의 2.2절에 언급한 정적압상력 조정과 함께 양력조절판 형식을 W100에서 W40형식으로 조정하였으며 그 결과 KHST열차의 330km/h 이상 고속대역에서 평균접촉력 특성은 아래 Fig. 6과 같이 조정되었다.

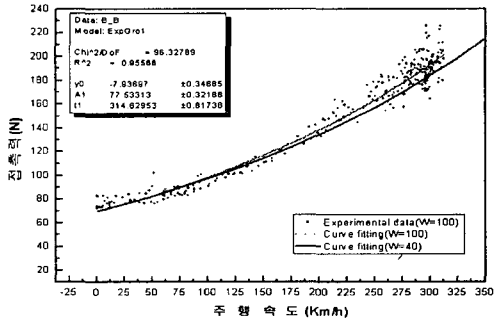


Fig. 6 Adjusted Mean Contact Force by Aerodynamic Parameter

이러한 공기양력 파라미터의 조정 영향이 반영된 결과, 최고 352km/h까지 주행할 때 속도별로 측정된 전차선과 팬터그래프의 접촉력 Data를 회귀곡선으로 Curve Fitting 한 결과로서, Fig. 7과 같은 열차속도에 따른 평균접촉력 경향 특성이 파악되었고, 이 때 $9.0478 \times 10^{-4} [N/(km/h)^2]$ 의 공기양력 계수를 가지는 것으로 분석되었다.

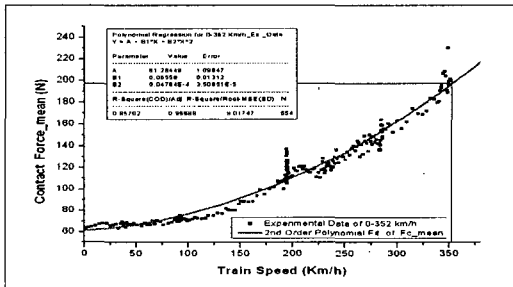


Fig. 7 Trend of Mean Contact Force of KHST's Pantograph

(4) 가선-집전장치 간 이선티특성 및 집전품질

고속철도시스템에서 전차선과 집전장치 간 이선티특성을 평가하는 방법은 유럽 EN규격과 UIC Code는 2가지의 평가 방법을 선택적 기준으로 정하고 있다.

첫 째는 실제 측정된 가선-집전장치 간 평균접촉력 (F_{mean})과 접촉력 표준편차의 3배 즉, 3σ 의 차를 속도별 기준 값과 비교해서 $F_{mean}-3\sigma$ 값이 0보다 작으면 이선티

(Loss of Contact)으로 판단함으로써 집전품질(Current Collection Criterion)을 평가하는 방법을 우선적 방법으로 정하고 있으며,

두 번째의 차선적인 방법은 접촉력 측정이 기술적으로 어려운 경우, 열차 주행 중 가선과 이선이 일어날 때 발생하는 전기적 아크(Arc)를 평가하는 이선티특성 평가 방법으로, 정격전류 30%이상(243A) 급전 중 1ms 이상 지속되는 아크들의 지속시간 누적 합(Σt_{Arc})을 총 집전 시간(Σt_{Run})으로 나눈 백분율 값이 1% 이하인지를 평가하거나, 300km/h로 주행 중 100m당 10ms 이상 지속된 아크가 1개 이내면 양호함으로 평가하는 방법을 대안의 이선티평가 방법으로 정하고 있다.

KHST열차는 전차선과 팬터그래프의 접촉력 측정이 가능한 집전성능 계측시스템과 평균접촉력, 표준편차 등 측정 데이터를 통계 분석할 수 있는 분석S/W 체계를 구축하고 있으므로 국제규격 EN50119에 정한 첫 번째 이선티특성 평가법을 적용해 평가하였으며, 실측 접촉력의 통계·분석 결과는 $F_{mean}-3\sigma$ (평균접촉력- 3σ 표준편차) 값이 154.7N인 것으로 분석되었다. (Fig. 3, $F_m-3\sigma$)

EN규격의 보편적인 평가기준은 $F_{mean}-3\sigma > 0$ (Positive)이나, SNCF와 스페인 고속열차 RENE는 $230kph < V \leq 300kph$ 범위에서 EN규격의 보편적 기준보다 더 엄격한 기준인 ($F_{mean}-3\sigma > 40N$)을 적용하고 있으며, 이를 준용하더라도 KHST열차는 352km/h 최고속도까지 주행할 때 집전 품질과 이선티특성에 있어 유럽 고속열차나 EN 및 UIC에 정한 기준 이내 또는 이상의 양호한 집전특성을 갖춘 것으로 분석되었다.(Table 1)

Table 1. 최고속도 350km/h주행 시 항목별 분석 결과

항목	평균접촉력 ($F_{c,mean}$)	최대접촉력 ($F_{c,max}$)	최소접촉력 ($F_{c,min}$)	이선티 특성 ($F_{mean}-3\sigma$)
열차 속도 (km/h)	198.9 N	275.6 N	165.7 N	154.7 N

2.4 350km/h 주행 중 전차선과 인터페이스 특성

(1) 전차선 압상량의 측정

KHST열차가 전차선 전주 지지점을 통과할 때 팬터 그래프가 전차선을 밀어 올리는 압상량은 표준 집전높이 (레일면부터 5,080mm)부터 최대 200mm까지 허용되며, 350km/h 주행시험 중 전차선 압상량 측정 방법은,

첫째, 열차 지붕에 설치된 카메라를 이용해 열차 주행 중 전차선 압상량과 접촉상태를 VTR에 녹화한 후, 최소단위

Frame인 30 Frame/sec까지 상세 분석하는 방법과,

열차가 최고속도 350km/h로 통과할 선로변 전주에 500 Frame/sec, 해상도 800×600이상 정밀 고속촬영용 Video 카메라("Phantom V7.0", 85~200mm Zoom Lens)를 설치하고, 열차통과 시 전차선의 최대 압상높이를 촬영, 분석하는 두 번째 측정 방법을 병용해서 측정하였다.

(2) 전차선 압상량과 접촉편위 측정 결과

KHST열차가 최고속도 350km/h로 주행할 때, 차량 탑재 카메라로 측정한 전차선 압상량은 최대 +145mm, 선로변 지상카메라는 최대 +125mm로 측정되어, 기준 내 양호한 인터페이스 특성을 갖춘 것으로 평가되며, 이를 통해 개발단계에 시뮬레이션을 통해 예측하였던 전차선 최대 압상량보다 실제 열차는 약 40-50mm 더 큰 압상 특성을 보인다는 점을 확인하였다.(Fig. 8, 9)

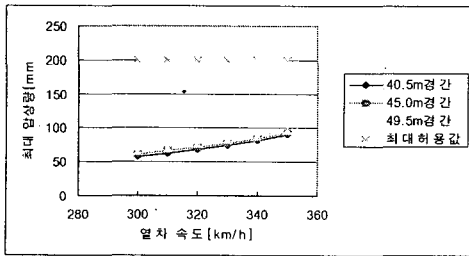


Fig. 8 Simulated Up-Lifting of Contact Wire by Passing of KHST

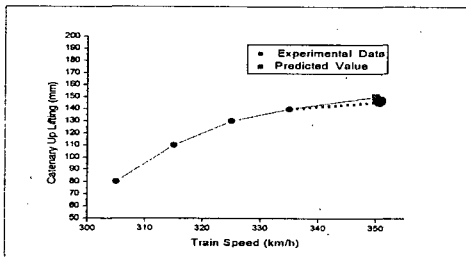


Fig. 9 Actual Up-Lifting of Contact Wire by Passing of KHST

전차선과 집전판의 접촉편위의 경우, 녹화된 접촉상태 영상Data 분석결과 집전판 중심선에서 좌우 ±230mm까지 접촉하였으며, 이는 KHST열차의 집전판 폭이 690mm의 집전범위를 가지며 전차선은 선로중심 기준 좌우 ±200mm로 시공되었음을 고려할 때, 집전판의 최대 집전 폭까지는 좌·우 각각 115mm까지 추가 집전가능 범위를 확보하며 접촉하였으므로, KHST열차는 최고속도인 350km/h로 주행할 때까지 집전장치와 가선계 전차선 사이에 매우 양호한 기계적 인터페이스 특성을 보였음이 확인되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 한국형 고속열차의 최고속도 352.4km/h까지 주행시험을 통해 경부고속철도 고속선의 전차선과 가지는 집전품질과 동특성 및 인터페이스 성능을 평가하였으며 그 결과,

전차선과 최대접촉력은 기준범위 내 275.6N의 양호한 특성을 갖추었고, 평균접촉력은 경부고속철도 가선기준 200N 이하인 198.9N으로 만족함을 입증하였다.

집전품질과 이선평의 경우 EN 및 UIC규격 기준을 만족하는 집전품질을 갖추고 전차선 압상량, 접촉 특성도 양호한 동적 인터페이스 성능을 갖추었음을 확인하였다.

결론으로, 지난 '96년부터 G7 고속전철기술개발사업을 통해 개발되고 기술완성을 목표로 현재도 본선 시운전을 통한 신뢰성 평가로 실용화를 눈앞에 둔 한국형 고속열차는 최고속도 352km/h까지 집전품질, 전차선과 동적 인터페이스 성능 목표를 만족함을 과학적으로 입증하였다.

앞으로 한국형 고속열차가 실용화되어 국민들에게 고속철도 서비스를 제공하기까지 차량시스템 및 판토틀라프 등 핵심장치와 Sub System을 대상으로 하는 동특성 해석 기법과 설계 파라미터 최적화를 위해 더 실제에 근접한 해석모델, 시험평가 기법 등 관련 연구 분야의 더 깊이 있고 유용한 연구가 후속되기를 기대한다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 고속철도기술개발사업으로 수행되었으며, 시운전 시험에 도움주신 한국철도공사(철도청), 한국철도시설공단 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발" 최종보고서(01-II-1-0-1), 2002.
2. 한국생산기술연구원, "고속전철 판토틀라프 개발" 2단계 2차년도 연차 보고서(00-II-2-1-10), 2001.
3. 목진용 외, "한국형 고속전철용 판토틀라프의 거동특성과 열차속도와 상관관계와 경향", 소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2003.
4. 서승일/목진용, "고속전철 집전장치 성능계측 결과 및 분석" 철도학회 춘계학술대회 논문집", 2003.
5. 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.
6. KHSR, "Qualification Test Procedure, Pantograph", 2001.
7. EN-50119 pp.15~45, European Committee For Electrotechnical Standardization, 2001.
8. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발" 연차 보고서, 2002.
9. RTRI, "Gasendo-S2 Manual", 1994.