

300km/h 이상 고속대역에서 한국형 고속열차의 집전특성 분석

Analysis on the current collection characteristics of the KHST in high speed range over 300km/h

목진용*, 박춘수¹, 김기환¹, 김영국¹

Jin-Yong Mok*, Choon-Soo Park, Ki-Hwan, Kim, Young-Guk 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 Korean High Speed Train(KHST) had been developed and evaluating on the Kyoung-Bu High Speed Line by through "G7-R&D project". In order to evaluate the function and characteristics of high speed train system, various experimental conditions have been considered and conducted. In this paper, current collection characteristics of KHST between pantograph and catenary system and dynamic behaviors are measured and analysed over 300 to 350km/h in running speed of KHST. A measuring system which was developed and installed on the Korean High Speed Train for the performance and mechanical characteristics of the KHST pantograph is used for this trial running test and we proved that KHST has a remarkable and stable current collection characteristics as it had been designed.

1. 서론

2004년 4월 1일 경부고속철도 개통은 104년 한국철도의 역사를 새롭게 써야할 만큼 철도기술의 변혁과 철도교통의 속도특성을 혁신한 큰 의미가 있는 사건이었으며 고속철도 개통이 있던 그 해 12월 16일 새벽 01시 24분, 정부의 지원 아래 우리 기술진들이 고속철도 기술의 완전자립을 목표로 1997년부터 G7 고속전철기술개발사업을 통해 자체 개발한 한국형 고속열차(KHST ; Korean High-Speed Train)가 목표한 최고속도 350km/h를 넘어 시속 352.4km/h를 돌파함으로써 프랑스, 독일, 일본 등 G7의 선진 철도국들의 기술수준까지 우리만의 고속철도 기술을 확보, 자립하겠다는 기술개발사업이 목표를 달성, 성공하였음을 과학적으로 당당하게 국내외에 입증해 보였다.

가선(Catenary)으로부터 전기에너지를 공급받아 열차의 동력원으로 이용하는 전기철도 시스템은 집전장치(Pantograph)가 전차선과 접촉하며 주행할 때 이선(Loss of Contact)을 얼마나 최소화하며 안정적으로 가선을 추종 접촉하면서, 얼마나 양호한 집전품질(Current Collection Criterion)을 유지하는가에 따라 전기철도시스템의 견인·제동력 등 주행성능을 절대적으로 좌우하게 된다.

최고 운행속도가 80~120Km/h인 통근형 전동차나 여타 저속대역의 전기철도시스템에 비해 200km/h 이상 350km/h까지 초고속으로 주행하는 고속철도시스템의 경우, 집전품질은 열차의 주행안정성과 최고속도 성능에 상대적으로 훨씬 더 크게 영향을 준다.

1. 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 경희원

본 연구는 경부고속철도 고속선에서 한국형 고속열차를 이용하여 최고속도 350km/h까지 본선 시운전시험을 시행하는 과정에서 측정된 가선계와 집전장치 간 접촉력, 이선특성 등 집전품질과 전차선 압상량·접촉편위 등 인터페이스 성능을 분석하고 한국형 고속열차의 집전특성에 대한 전반적 분석, 평가한 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2. 1 한국형 고속열차의 집전장치 개요

이 연구에 활용된 한국형 고속열차는 동력차 2량과 동력궤차 2량, 궤차 3량 등 총 7량으로 편성되어있고, 가선계 전차선으로부터 열차에 25kV의 고압전원을 공급받는 판토틀라프(pantograph)는 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 총 2조가 설치되어 있으나, 열차가 정상운행 모드로 운행할 때는 열차의 진행방향을 기준으로 후부 동력차에 탑재된 판토틀라프 1조만을 상승시켜 가선계 전차선에 접촉, 집전함으로써 열차 주행에 필요한 전기 동력을 제공하는 방식을 적용하고 있다. (Fig. 1)

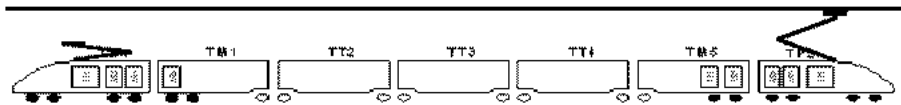


Fig. 1 Arrangement of Pantograph in KTX Train-Set

따라서 2조 이상 집전장치를 동시에 가선에 접촉시켜 집전하는 전동차나 동력분산식 고속전철에 비해, 2조 중 1개 집전장치만 전차선과 접촉시켜 동력을 공급받는 한국형 고속열차의 집전장치는 상대적으로 훨씬 높은 신뢰도와 안정적인 가선 추종성이 요구되며, 집전장치의 집전품질과 가선계와의 상호작용 성능에 대한 평가는 전체 열차성능 평가에 있어서 중요한 의미를 가진다.

경부고속철도 가선계와 한국형 고속열차 판토틀라프의 접촉력 계측·분석은 한국형 고속열차에 구축된 계측시스템을 활용하였으며, 전차선과 판토틀라프 집전판(Pan head)이 접촉할 때 집전장치와 전차선 사이의 작용력 즉, 접촉력(Contact Force)의 측정은 집전판을 지지하는 좌우법에 작용하는 물리량을 압축 Load Cell 센서를 통해 500Hz~2KHz로 Sampling하여 측정하였다[1-5].

측정데이터의 분석은 Lab View_6.0i를 기반으로 G7 고속전철기술개발사업을 통해 개발한 분석 프로그램을 이용해 본선 시운전을 통해 측정된 데이터를 후처리 및 통계·연산 처리하였다.

2. 2 최고속도 350km/h 주행시험에 대비한 사전 안전조치

2. 2. 1 집전장치 정적 압상력(Static Up-Lifting Force)의 조정

한국형 고속열차는 350km/h까지 증속시험을 추진해오는 과정에서 최초로 300km/h 주행시험에 성공한 이후, 매 10km/h 마다 전 단계 증속시험 측정결과를 기초로 다음 10km/h 증속 시 열차의 주행안전성과 안전성에 대한 평가를 한 후, 예측 결과 안전성이 확신되어야만 증속을 시행하였으며, 330km/h 주행시험부터는 집전장치의 평균접촉력이 허용 기준인 200N을 다소 초과할 것으로 예측되어 집전장치의 스프링 힘에 의한 정적압상력(Static Up-Lifting Force) 기준은 경부고속철도 가선계의 경우 $70 \pm 10N$ 이므로 접촉력을 낮추고자 기준 값보다 8N 낮은 62N으로 하향 조정 한 상태에서 330km/h부터 350km/h까지 증속 주행시험을 실시하였다[6].

2. 2. 2 집전장치 높이상승 제한장치(HSL, Stopping Device)의 조정

전차선 Steady Arm은 열차 통과 시 최대 200km/h까지 상승되며, 한국형 고속열차는 대일면에서 5.280mm에서 판도그라프 높이를 제한하는 높이상승 제한장치가 설치되어 있으나, 열차가 최고속도인 350km/h로 통과할 때 전차선 최대 상승병위를 조가해 있어 올리지 못하도록 최대 상승높이보다 40mm 낮은 높이에서 구속시켜 조정하는 안전조치 후, 350km/h 주행시험을 실시하였다.

2. 3 최고속도 350km/h 주행 시 전차선과의 접촉력 특성

2. 3. 1 가선-집전장치 간 최대 접촉력 특성

200km/h이상 고속영도의 전차선 최대접촉력은 EN 50119는 최대 350N까지를 설계기준으로 정하고 있고, 프랑스 SNCF는 최대접촉력이 300N 이하이면 양호한 수준으로 판단하고 있다.[7].

제발 단계에서 한국형 고속열차가 330~350 km/h로 주행할 때 최대접촉력 특성을 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 2와 같이 340km/h 이상부터는 300N을 초과할 것으로 예측되었으나, 실제 시운전시험으로 측정된 최대 접촉력은 Fig. 3과 같이 275.6N으로 분석되었으며, 이는 시뮬레이션 조건은 양력 조정판 폭 W100 형식, 정적압상력 70N 조건인 반면, 실제 주행은 양력조정판 폭 W40, 정적압상력을 62N으로 조정함으로써 실제 350km/h 주행 시 최대 접촉력은 300N 이하로 나타난 것으로 판단되었다[8], [9].

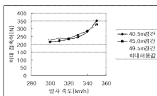


Fig. 2 Simulation Result for Max. Contact Force



Fig. 3 Experimental Result for Max. Contact Force

2. 3. 2 가선-집전장치 간 평균접촉력 특성 분석

한국형 고속열차가 352km/h속도까지 주행할 때 식속원 가선기의 평균접촉력은 Fig. 5와 같이 198.9N으로 분석되었으며, 이는 340km/h까지 주행시험 결과로 예측한 350km/h에서 평균접촉력 199~200N에 근접하나 정적압상력 70N, 양력조정판 W100 기준으로 시뮬레이션 한 평균접촉력 예측값과 비교할 때, 시뮬레이션 결과보다는 실 평균접촉력이 8~9N 낮은 것으로 분석되었다.(Fig. 4, 5)

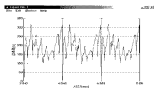


Fig. 4 Simulation Result for Mean Contact Force of KHST at 350 km/h

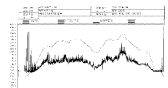


Fig. 5 Experimental Mean Contact Force of KHST up to 350 km/h

2. 3. 3 최고속도 350km/h 주행 시까지 평균접촉력 변화 경향

한국형 고속열차가 최고속도 352km/h까지 주행할 때 측정된 전차선과 판토티라프 간 속도별 접촉력 데이터를 회귀곡선으로 Curve Fitting한 결과, Fig. 6과 같이 열차속도에 따른 평균접촉력 변화 경향을 가지는 특성이 파악되었고, $9.0478 \times 10^{-4} [N/(km/h)^2]$ 의 공기양력 계수를 가지는 것으로 분석되었다.

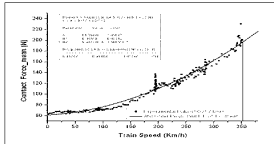


Fig. 6 Trend of Mean Contact Force between KHST's Pantograph and Catenary

2. 3. 4 기선-집전장치 간 이선특성 및 집전품질

고속전도시스템에서 전차선 기선제와 집전장치 간 이선특성을 평가하는 방법은 유럽의 EN규격과 UIC Code의 경우 2가지 평가 방법을 선택적 기준으로 규정하고 있다.

첫째는 실제 측정된 기선-집전장치 간 평균접촉력(F_{mean})과 접촉력 표준편차의 3배 즉, 3σ 의 차를 속도별 기준 값과 비교해 기준 값($F_{mean}-3\sigma > 0$)보다 작으면 이선(Loss of Contact)으로 판단, 집전 품질(Current Collection Criterion)을 평가하는 방법을 우선적으로 정의하고 있으며,

다른 방법은 접촉력 측정이 기술적으로 어려울 경우, 열차 주행 중 발생하는 전기 아크(Arc)에 의한 이선특성 평가방법으로서, 정격전압의 30%이상(243A) 급전 시 1ms 이상 지속되는 아크만을 대상으로 지속시간의 누적 합(Δt_{sum})을 총 집전시간(Δt_{sum})으로 나눈 값이 1% 이하인지, 또는 300km/h로 100m당 10ms 이상인 아크가 1개 이상인 기준하는 이선을 평가하는 차선 방법으로 정의하고 있다.

한국형 고속열차의 경우, 전차선과 판토티라프의 접촉력을 측정할 수 있는 집전 계측시스템과 평균 접촉력, 표준편차 등 측정 데이터의 통계분석이 가능한 분석S/W 제재를 갖추었으므로 EN규격의 첫 번째 이선특성 평가법을 적용하였으며, 선속 접촉력을 통계분석한 결과 $F_{mean}-3\sigma$ (평균접촉력-3표준편차) 값은 154.7N으로 분석되었다. (Fig. 3, $F_{m}-3\sigma$)

실제로 EN규격에 정의된 집전품질 평가기준은 $F_{mean}-3\sigma > 0$ (Positive)이나, SNCF와 스페인 고속열차 RENEFE는 230kph<math>V \leq 300kph 범위에서 더 엄격한 기준($F_{mean}-3\sigma > 40$ N)을 적용하고 있으며, 이를 준용하여도 한국형 고속열차가 352km/h 최고속도까지 주행할 때 집전품질/이선특성에 있어 유럽 EN 및 UIC에서 정의한 기준 내 양호한 집전특성을 갖춘 것으로 분석되었다.(Table 1)

Table 1. 최고속도 350km/h에서 특성 항목별 측정분석 결과

항목	평균 접촉력 (F_{mean})	순간 최대접촉력 (F_{max})	순간 최소접촉력 (F_{min})	이선 특성 ($F_{mean}-3\sigma$)	평가 결과
열차 속도 349-352 (km/h)	198.9 N	275.6 N	165.7 N	154.7 N	양호

2. 4. 최고속도 350km/h에서 전차선 압상량 및 위치결측 특성

2. 4. 1. 전차선 압상량 측정 방법

열차가 전차선의 경우 지지점을 통과할 때 편도그래프의 집전편이 전차선을 밀어 올리는 압상량은 표준 집전편이(레일높이에서 5,080mm)부터 최대 200mm까지 허용되며, 350km/h 최고속도 시에는 첫째, 열차의 지붕에 설치된 카메라를 이용하여 열차 주행 중 전차선 압상량과 접촉 상태를 VTR에 영상 Data로 녹화한 후, 피소단위 영상 Frame(30 Fr.)까지 상세하게 분석하는 방법과,

둘째, 열차가 최고속도 350km/h로 통과할 때 500 Frames/sec, 해상도 800×600여 상 결밀 고속촬영용 Video 카메라(Phantom V7.0*, 85×200mm Zoom Lens)로 설치하고, 열차 통과 시 전차선의 최대 압상량이란 현상, 분석하는 두 가지 측정방법을 병용, 측정하였다.

2. 4. 2. 전차선 압상량 및 접촉편위 분석

한국형 고속열차가 최고속도 350km/h로 통과할 때, 차량 탑재 카메라로 측정된 전차선 압상량은 최대 +145mm, 선로면 지상설치 카메라에서는 최대 +125mm로 측정되어, 차량 카메라 측정값을 기준으로 전차선 압상량(또는 집전편 수직변위)은 최대 +145 mm로서, 기존 내 양호한 인터페이스 특성을 갖춘 것으로 평가되며, 이를 통해 개발단계에 시공레이철을 통해 계속하였던 전차선 최대 압상량보다 실제 열차는 약 40~50mm 더 큰 압상특성을 보인다는 점을 확인하였다.(Fig. 7, 8)

전차선과 집전편의 접촉편위인, 특별한 접촉상태 영상 Data로 통해 중심선 기준 좌우 ±230mm까지 접촉량 것으로 분석되었으며, 이는 한국형 고속열차가 폭 690mm(집전편)의 집전편위를 가지며 전차선이 선로중심 기준 좌우 ±200mm로 시공되었음을 고려할 때, 집전편의 최대 집전폭은 좌우 115mm의 추가 집전가능 범위의 여유를 갖고 접촉하였으므로, 한국형 고속열차는 최고속도 350km/h로 주행할 때까지 집전편치와 가선계 전차선 사이에 매우 양호한 인터페이스 특성을 보였음이 확인되었다.

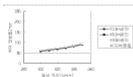


Fig. 7 Simulation Result for Up-Lifting of Contact Wire by Passing of KST

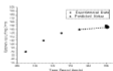


Fig. 8 Up-Lifting of Contact Wire by Passing of KST

4. 결 론

한국형 고속열차가 최고속도 352km/h까지 주행시험을 통해 경부고속선의 고속선 가선계 전차선과 가지는 인터페이스 성능 및 집전특성을 평가한 결과,

최고속도 352km/h까지 전차선과 최대접촉력은 275.6N으로서 양호한 접촉력 특성을 갖추었고, 평균접촉력은 198.0N으로서 경부고속선도 가선기준인 200N 이하를 만족함을 입증하였다.

집전편치와 이철특성 항목에서도 352km/h까지 유럽 EN 및 UK규격의 전차선 성능기준을 만족하는 집전특성을 갖춘 것과 전차선과 기계적 인터페이스 항목인 전차선 압상량은 +145 mm, 집전편-전차선 접촉은 최대 좌우 ±230mm로서, 양호한 기계적 인터페이스 성능을 갖춘 것으로 평가되었다.

결론적으로, 지난 '97년부터 G7 고속전철기술개발사업을 통해 개발되어 빠른 시일 내 실용화를 눈앞에 두고 개발 기술의 완성을 목표로 현재도 매주 4회 본선 시운전을 통해 신뢰성 평가연구를 추진 중인 한국형 고속열차는 최고속도 352km/h까지, 집전품질, 가선계 인터페이스 성능 면에서 개발 목표를 충분히 만족하는 성능을 갖추었음을 352km/h 주행시험을 통해 과학적, 객관적으로 입증하였으며,

또한 철도시설물 성능검증 관점에서, 금번 최고속도 352km/h 주행시험을 통해 경부고속철도 전차선 설비의 급전품질, 차량 인터페이스 성능이 설계최고속도 350km/h까지 양호하게 시공, 유지·관리되고 있음을 우리 기술로 시험·검증한 점에서 기술적 의미와 가치가 크다고 본다.

앞으로도 한국형 고속열차의 실용화를 통해 대국민 고속철도 서비스를 제공하는 단계로 발전하기까지 차량시스템 및 판토티그래프 등 핵심장치와 Sub System을 대상으로 하는 설계 파라미터 최적화, 동특성 해석기법과 새로운 해석모델, 시험평가 기법 등 관련 분야의 더 깊이 있고 유용한 연구가 후속되기를 기대한다.

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 본 시운전시험과 연구에 도움을 주신 한국철도공사(철도청), 한국철도시설공단 관계자 여러분들의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발" 최종보고서(01-II-1-0-I), 2002.
2. 한국생산기술연구원, "고속전철 판토티그래프 개발" 2단계 2차년도 연차보고서(00-II-2-1-10), 2001.
3. 목진용 외, "한국형 고속전철용 판토티그래프의 거동특성과 열차 속도와의 상관관계와 경향", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
4. "고속전철 집전장치 성능계측 결과 및 분석" 서승일/목진용, 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. Korea High Speed Rail, "Qualification Test Procedure Train-set Pantograph Test", 2001.
7. EN-50119 pp.15~45, European Committee For Electrotechnical Standardization
8. 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발" 연차보고서, 2002.
9. RTRI, "Gasendo-S2 Manual", 1994.