

고속선 및 기존선에서 한국형 고속열차의 집전특성 분석
-판토히라프-카선 간 접촉력 경향을 중심으로-
Analysis on the Current Collection Characteristics of Korean
High-Speed Train in High-Speed Track and Conventional Lines

목진용* 김영국* 박준수* 김기환* 이성호*
Jin-Yong Mok Young-Guk Kim Choon-Soo Park Ki-Hwan, Kim Sung-Ho, Lee

ABSTRACT

The pantograph for Korean High Speed Train was developed and had been evaluating by through "G7 R&D project" for home grown high speed train technology. In this paper, from the point of view in mechanical aspect, comparison study on the current collection characteristics between the KHST pantograph and contact wire in catenary system on the High-Speed Line and Ho-Nam/Kyoung-Bu conventional lines is conducted. A measuring system for the performance and mechanical characteristics of the KHST pantograph is used for this study, which was developed and installed on the Proto-type Korean High Speed Train, and physical characteristics were measured while the KHST runs on the High-Speed Line and conventional lines. Through this study, remarkable variations of characteristics which can affect to a current collection quality of high-speed train are found and analyzed from measured mean contact forces in both tracks.

1. 서론

집전장치를 통해 가선으로부터 전기에너지를 공급받아 동력으로 이용하는 고속열차는 전차선로의 설치상태와 차량에 설비된 집전장치가 가선에 대하여 가지는 접촉력을 얼마나 안정적으로 유지하면서 가선 추종성을 가지고 양호한 집전품질을 가지는가에 따라 열차의 주행 성능은 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 한국형 고속열차가 경부고속철도 구간에 있는 고속선로와 고속선에 연결된 호남선, 경부선 등 기존선로를 각각 주행할 때, 집전장치가 가선계에 대하여 가지는 접촉력 등 물리적 특성을 측정하고 그 측정 결과에 대한 경향을 선로 조건별로 비교 분석함으로써 한국형 고속전철의 집전장치가 고속선로와 기존선로에서 가지는 집전 특성을 비교 평가하였다.

* : 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 책임연구원

이 연구에 활용된 한국형 고속열차는 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량 등 총 7량으로 편성되어있고, 가선계의 전차선으로부터 열차에 25kV의 고압전원을 공급받는 판토품라프(pantograph)는 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 총 2조가 설치되어 있으나, 열차가 정상운행 모드로 운행할 때는 열차의 진행 방향을 기준 할 때 후부 동력차에 탑재된 판토품라프 1조만을 상승시켜 가선계 전차선에 접촉, 집전하고 이를 통해 열차에 필요한 모든 전기동력을 제공하는 방식을 적용하고 있다. (Fig. 1)

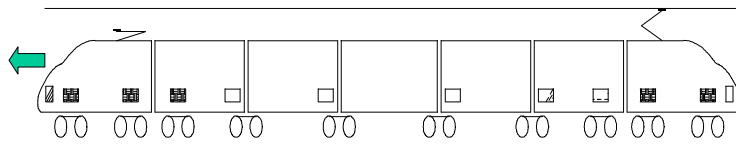


Fig. 1 Pantograph Arrangement in Train Set of KHST

그러므로 열차가 운행할 때, 여러 조의 판토품라프를 동시에 가선에 붙여 집전하는 전동차나 분산식 고속전철 시스템에 적용되는 판토품라프에 비해, 한국형 고속열차의 판토품라프는 상대적으로 훨씬 높은 신뢰도와 안정적인 가선 추종성이 요구되며 이러한 집전장치에 요구되는 특성은 우리와 같이 고속열차가 전용 선로인 고속선뿐만 아니라 기존 선로의 전철화 구간에서도 연계 운행해야 하는 여건에서는 필수적으로 요구되는 특성임을 감안할 때, 기존선로에서 운행할 때에도 고속열차의 집전장치가 가선계에 대하여 가지는 집전 특성의 평가와 분석 연구는 중요한 의미를 가진다고 본다.

2. 가선계-집전장치의 구조와 접촉력 측정

2.1 가선계 전차선과 고속열차 집전장치의 구조

한국형 고속열차에 있어 열차의 동력으로 이용되는 25kV 전력을 공급하는 가선계(Catenary System)의 전차선과 열차에 탑재된 판토품라프의 구조는 Fig. 2, 3과 같으며, 열차의 운행 중에 전차선과 판토품라프의 집전판(Pan head)이 접촉할 때 집전장치가 전차선을 압상하면서 작용하는 접촉력(Contact Force)은 집전판 하단의 좌·우빔에 연결된 1차 스프링 2개소에 작용하는 힘을 Load Cell 방식 센서를 이용하여 측정함으로써 실제적인 물리량 값으로 측정하였다.[1-2],[4]

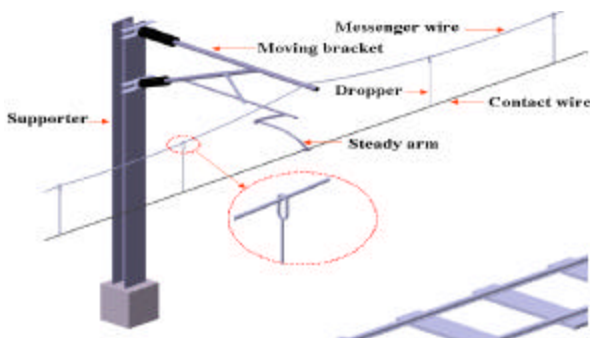


Fig. 2 Schematic View of Catenary System in High-Speed Line

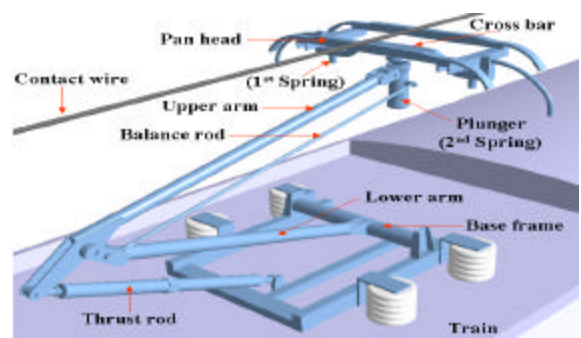
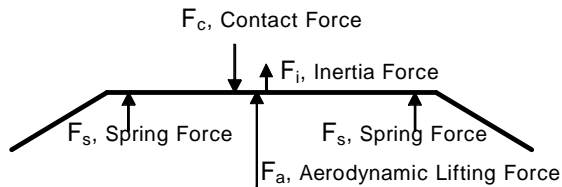


Fig. 3 Schematic View of Pantograph in KHST

2.2 집전장치-가선계 전차선간 접촉력 측정

전차선과 판토품라프 집전판(Pan Head) 사이의 접촉력은 Fig. 4 힘 평형 상태도에서 보이는 작용력들에 대해 아래 (1), (2) 평형식에서 보이는 $F_{c(mean)}$ 값을 500 Hz 간격으로 샘플링, 측정하였으며 계측시스템은 접촉력 분석에 필요한 집전장치 좌·우빔 전단력, 가속도 등 물리량 신호를 13개 채널로 분류, 수집할 수 있도록 구축된 한국형 고속열차의 집전성능 계측시스템을 활용하였다.[3-4]



$$F_i = -F_c + F_a + F_s \quad (1)$$

F_i = 관성력(inertia force)

F_c = 접촉력(contact force)

F_a = 양력(lifting force)

F_s = 스프링 반력(spring force) 압상력

Fig. 4 Equilibrium condition between Pan Head and Catenary

식 (1)에서 질량을 가진 판토품라프의 상하 가속도 운동에 따른 관성력 F_i 는 평형 위치를 기준으로 상·하 방향으로 교번하며 작용하므로 평균값은 “0”으로 간주할 수 있어 (1)식은 평균 접촉력에 대하여 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.[5-6]

$$F_{c(mean)} = F_a + F_s \quad (2)$$

여기서, $F_{c(mean)}$ = 집전판과 가선의 평균 접촉력

3. 한국형 고속열차의 선로별 접촉력 특성

3.1 기존선 주행 시 가선-집전장치간 접촉력 특성

한국형 고속열차를 이용한 기존선에서의 집전특성 시험은 경부고속철도 고속선과 연결된 경부선과 호남선 전철화 구간에서 6회에 걸쳐 이루어졌으며 이 구간에서 한국형 고속열차 집전장치의 집전 특성을 측정된 결과, 다음 Fig. 5~6에 보이는 접촉력 특성을 얻을 수 있었다.

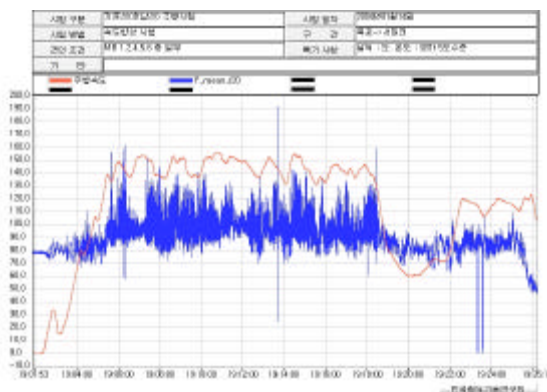


Fig. 5 Contact Force between Catenary-Pantograph in Conventional Ho-Nam Line

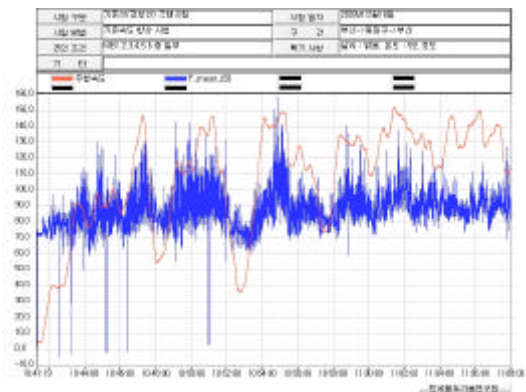


Fig. 6 Contact Force between Catenary-Pantograph in Conventional Kyung-Bu Line

3.2 고속선 주행 시 가선-집전장치간 접촉력 특성

한국형 고속열차를 이용한 고속선 집전특성 시험은 경부고속철도 광명-오송 구간에서 매주 1회씩 시행하고 있으며 기존선 시험 때와 동일한 차량의 조건·상태에서 집전장치의 가선에 대한 접촉 특성을 측정하였다. Fig. 7~8에는 고속선에서 한국형 고속열차가 최고속도 300~310 km/h로 주행할 때 집전장치의 특성을 대표적으로 보이는 접촉력 측정 결과를 도시하였다.

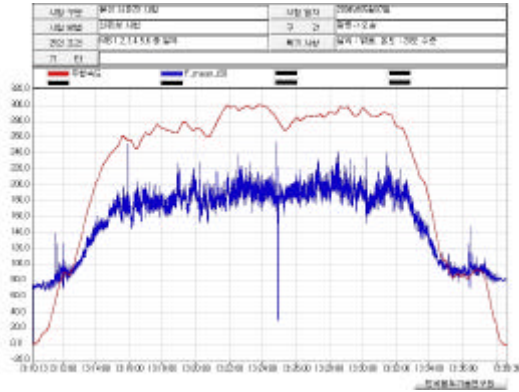


Fig. 7 Contact Force between Catenary-Pantograph in High-Speed Line (300Km/h)

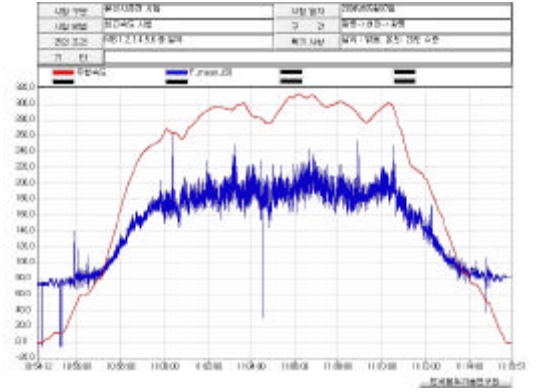


Fig. 8 Contact Force between Catenary-Pantograph in High-Speed Line (310Km/h)

3.3 한국형 고속열차의 기존·고속선 선로별 접촉력 특성 비교·평가

앞 3.1, 3.2절에 보인 기존선 및 고속선에서 한국형 고속열차 집전장치의 집전특성을 집전품질 관점에서 비교·평가한 결과 각각 다음과 같은 차별성을 가지는 것이 분석되었다.

1) 동일 속도대역에서 평균접촉력 증가 SLOPE의 경향

고속철도 개통 전까지 기존선에서 열차의 최고 운행속도는 직선선로에서 140km/h로 제한되었으나 그간 철도청이 추진해 온 선형개량사업, 전철화사업 등을 통해 선로조건이 향상되었으므로 주행시험은 최고 160km/h까지 증속시험이 가능하였고, 160km/h까지 열차의 속도증가에 따른 평균접촉력을 측정하고 그 경향을 동일 속도대역에서 기존선(호남/경부선)과 고속선을 대비하여 분석한 결과 Fig. 9~10에 보이는 바와 같이 평균접촉력의 증가 경향에 있어서 큰 차이가 있음 수치적으로 확인할 수 있었다.

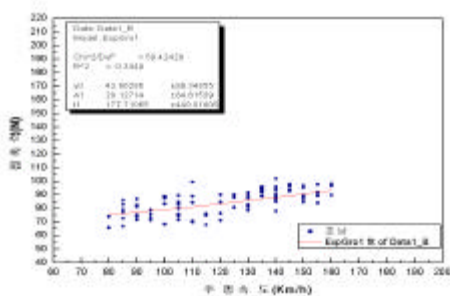


Fig. 9 Increase Trend of Mean Contact Force in Conventional Ho-Nam Line

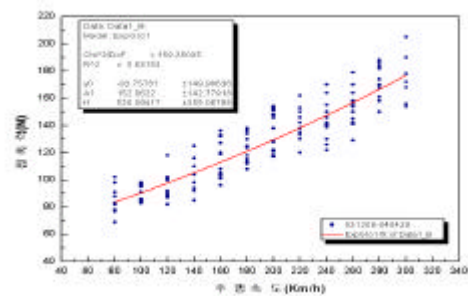


Fig. 10 Increase Trend of Mean Contact Force in High-Speed Line

위의 분석결과를 정리한 아래 표1에 나타난 바와 같이, 열차의 속도가 80~160km/h까지 증가함에 따라 기존선의 경우 평균접촉력이 15~18N으로 소폭으로 증가하는 반면, 고속선에서는 30N까지 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향의 차이는, 고속선의 경우 열차가 정지상태에서 최고속도 300km/h로 급가속하는 패턴 구간에서는 정속주행 또는 제동 시에 비해 평균접촉력이 6-8.5배 이상 급격히 증가하는 특성*들이 정확하게 나타나는 반면, 기존선에서는 열차의 운행초기 가속시간이 상대적으로 길고, 80~160 km/h 속도대역에서 운행패턴이 급가속보다는 정속 또는 타행으로 운행하므로 평균접촉력이 고속선에 비해 원만하게 증가하는 주된 원인이 되는 것으로 판단되었다.*[7].

선로 구분 열차속도 (km/h)	고속선		기존선(호남선)		기존선(경부선)	
	Mean Contact -Force (N)	$\Delta F_{c(mean)}$ (N)	Mean Contact -Force (N)	$\Delta F_{c(mean)}$ (N)	Mean Contact -Force (N)	$\Delta F_{c(mean)}$ (N)
80 ⇔ 160	83 ⇔ 113	30	75 ⇔ 93	18	80 ⇔ 95	15

Table 1. Increase of Mean Contact Force in High-Speed Line vs. Conventional Lines

이 이외에도 고속선로는 레일이음매가 없는 장대 용접레일을 적용하고 레일 불규칙도가 정밀하게 시공되어 차량이 주행중 레일로부터 받는 충격력이 작은데 반해, 기존선에서는 선로이음매 부위의 수직 충격력과 레일 불규칙도 영향이 차량의 수직거동을 증대시키고, 이러한 차량의 수직방향 거동은 지붕에 탑재된 집전장치가 가선과 접촉하며 상호 작용하는 과정에 부가적인 외력으로 작용하여 평균접촉력을 증가시키는 요인이 되었다고 분석되었다.

그렇지만 지금까지 전기식 철도시스템 집전장치의 동적 특성에 대하여 연구된 동특성 해석 방법들은 집전장치를 Mass-Spring Model로 단순화 또는 선형화시켜 해석하는 근사 해법을 이용하거나 가선계를 집중질량(Lumped Mass)으로 연결해 동역학적으로 해석하고 거동 특성을 예측하는 방법을 이용하여 왔으나, 차량의 수직거동을 집전장치-가선계간 접촉력에 영향을 미치는 Factor로 고려하여 모델링하고 해석하는 면에서는 한계가 있으므로 위에 논의한 차량의 수직방향 거동이 집전장치-가선계간 접촉력 어떤 정도의 크기의 부가적 외력으로 작용하는가를 정량적으로 판단하는데는 어려움이 있었다.[8-9]

2) 동일 속도대역(100~160km/h)에서의 평균접촉력 변동 폭

위 3.1~3.2절 Fig. 5~6(기존선)과 Fig. 7~8(고속선)에서 도시한 기존선 및 고속선에서 집전장치의 접촉력 변동폭을 관심 있는 속도대역(100~160km/h)에서 선로 조건별로 비교한 결과 아래 표2와 같이 기존선에서의 접촉력 변동폭이 고속선에 비해 100~110km/h 대역에서 약 1.4배, 150~160km/h 대역에서는 약 2.3~2.9배 이상 큰 값을 가지는 차별성을 찾을 수 있었다. 이러한 접촉력 변동폭의 크기는 일반적으로 집전장치의 가선 추종성과 이선 정도(Loss of Contact)를 판단하는 기준인 $F_{c(mean)} - 3\sigma$ 값을 저하시키고 집전 품질에 영향을 주는 주요한 Factor로 작용하는 것으로 연구된 바 있다.[10].

선로 구분 열차속도 (km/h)	고속선		기존선(호남선)		기존선(경부선)	
	Contact Force (N)	Peak to Peak(N)	Contact Force (N)	Peak to Peak(N)	Contact Force (N)	Peak to Peak(N)
100-110	88-97	9	74-87	13	80-98	18
145-155	109-119	10	87-110	23	90-119	29

Table 2. Deviation of Measured Contact Force in High-Speed vs. Conventional Lines

이런 관점에서, 한국형 고속열차의 거동안정도는 150~160km/h의 속도대역에서 기존선을 주행할 때 상대적으로 고속선에 비하여 약 2.3~2.9배 수준으로 낮아지며, 이러한 접촉력 변동폭이 커지는 특성은 기존선에서 고속열차가 주행할 때 고속선에 비해 아크발생이나 이선을 증가시키는 원인이 될 수 있다고 추정할 수 있다.

기존·고속선 별 접촉력 변동폭 차이는 고속선로의 전차선 특성이 고속열차가 최고 300km/h까지 고속주행이 가능토록 20kN의 장력으로 정밀하게 설계·시공된 반면, 기존선로는 잦은 급곡선 구간과 행거간격의 차이, 전차선 장력도 12kN으로 저속운행 기준으로 낮게 시공된 차이점과 시험 당시 기존선의 전차선이 건설 직후 충분히 안정화되지 못한 상태인 점 등 여러 가지 여건상 차이로 인해 집전장치가 가선계와 가지는 상호 작용력에 영향을 받은 결과로 분석되었다.

기존선의 전차선 신설단계 여건의 영향은 고속열차의 여러 차례 시험운행과 개선으로 영업개통 전까지 기준 수준까지 안정화되어 성공적인 고속철도의 개통을 보았으며, 개통 이후로도 기존선 전차선 상태는 지속적인 유지보수 활동을 통해 일정 수준까지 안정화, 개선된 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 한국형 고속열차를 이용하여 경부고속철도 고속선과 이에 연결되어 고속열차가 운행되는 호남·경부선 등 기존선로에서 시운전 시험을 통해 얻은 각 선로별로 가선계 전차선과 집전장치 사이에 작용하는 평균접촉력 등 집전특성에 대한 측정 결과를 동일 속도대역에서 집전품질 관점으로 비교·분석한 결과를 제시하였고, 그 결과는 아래와 같았다.

- i) 열차 속도가 160km/h까지 증가할 때, 기존선에서의 평균접촉력은 15~18N으로 소폭 변화하는 반면, 고속선에서는 30N까지 증가하는 특성차이를 보인다. 이 차이는 고속선의 경우 열차가 정지상태에서 최고속도 300km/h로 급가속하는 구간에서는 정속주행 시에 비해 접촉력이 급격히 증가하는 특성을 갖지만 초기 가속이 상대적으로 느리고 160 km/h대역의 운행패턴이 급가속보다는 정속도 또는 타행 운전하는 기존선에서는 접촉력이 고속선에 비해 서서히 소폭 증가하기 때문인 것으로 판단되었다.
- ii) 100~160km/h의 동일 속도대역에서 분석한 결과, 기존선에서 접촉력의 변동폭은 고속선에 비해 100km/h에서 약 1.4배, 150km/h에서는 약 2.3~2.9배 이상 큰 폭으로 변동하는 차이가 있었고 이는 집전장치의 가선 추종성을 판단하는 $F_{c(mean)} - 3\sigma$ 값을 저하시켜 집전품질에 영향을 주므로, 고속열차가 기존선을 주행할 때 고속선에 비해 아크발생이나 이선이 증가하는 원인이 될 수 있으

며, 이런 차이는 고속 전차선이 최고속도 300km/h까지 고속주행이 가능토록 장력 20kN으로 정밀설계·시공된 반면, 기존선의 경우 행거간격, 12kN의 작은 전차선 장력 등 저속용으로 시공된 차이에서 기인하는 것으로 판단되었다.

본 연구를 수행한 결과로 위에서 검토, 제시된 바와 같이 고속선 및 기존선에서 한국형 고속열차의 집전특성을 분석 제시하였으며, 연구수행 과정에서 미흡한 점은 집전장치와 가선계의 전차선 간 접촉력에 영향을 줄 수 있는 다양한 Factor 중 차량의 수직거동 영향을 고려한 집전장치의 동역학적 특성을 해석 해석하는 기법의 필요성을 느꼈으며, 향후 이 분야에 대한 좀더 심도 있는 연구가 계속 필요한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 관계자 여러분들의 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, “G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발(I,II)” 최종보고서 (01-II-1-0-1), 2002.
2. 한국생산기술연구원, “고속전철 판토틀라프 개발” 2단계 2차년도 연차보고서(00-II-2-1-10), 2001.
3. 목진용 외, “한국형 고속전철용 판토틀라프의 거동특성과 열차 속도와의 상관 관계와 경향“, 소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2003.
4. “고속전철 집전장치의 성능계측 결과 및 분석” 서승일/목진용 외, 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. 목진용 외, “열차의 운행패턴과 속도에 따른 한국형 고속전철용 판토틀라프의 접촉력과 가속도 거동의 변화 경향”, 소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2004
8. Katsushi Manabe, “High-Speed Contact Performance of a Catenary- Pantograph System”, JSME Int’ 1 Journal, Vol. 32, No. 2, pp.31-40, 1989.
9. RTRI, “Gasendo-S2 Manual”, 1994.
10. Mark A Gabbott, “Catenary and Pantograph Design and Interface”, pp. B5-4~5, Institution of Electrical Engineers, Savoy Place, London, 2003