

고속 시험선 구간에서의 G7 본선 시운전에 대비한 G7 팬터그래프와 KTX 가선계와의 인터페이스 연구

A Study on the Interface between a G7 Pantograph and a KTX Catenary System in Preparation for G7 On-line Tests in the Korea High Speed Test Track

조용현,* 경진호,** 허신,** 최강윤,*** 김기환***
Yong Hyeon Cho, Jinho Kyung, Shin Hur, Kangyoun Choe, Ki-Hwan Kim

ABSTRACT

It is necessary to perform a study on the interface between a G7 pantograph and a KTX catenary system prior to G7 on-line tests in the Korea High Speed Test Track in order to predict how high current collection quality can be obtained during the on-line tests and check if safety problems shall be caused by the tests or not. According to the simulation results, current collection quality of the G7 pantograph at 350 km/h is lower than that of a GPU pantograph at 300 km/h, but the contact wire uplifts and average contact forces are within the safe-zone. In addition, the ratio of running speed(350 km/h) to wave propagation speed is low enough for safe running. Therefore, the G7 on-line tests at 350 km/h in the Korea High Speed Test Track is expected not to cause the safety problem.

1. 서론

본 연구는 G7 시제 열차가 경부고속철도 시험선 구간에서 시운전 시험을 하기에 앞서, G7 시제 열차에 탑재된 팬터그래프의 집전 시험에 의하여 경부고속철도 가선계(이후부터 KTX 가선계라고 함)에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지와 집전과 관련하여 안전에 문제 없는지를 검토하는 것을 목표로 한다. 여기서 G7 팬터그래프 및 시제 열차는 현재 G7 고속전철기술개발사업에서 개발된 팬터그래프와 차량 시제품을 말한다. 가선계 및 팬터그래프로 이루어지는 집전시스템은 전력을 견인전동기에 공급해주는 중요한 기능을 하므로 시제 열차의 속도 향상 여부를 결정하는 아주 중요한 부분이다. 또한, KTX 가선계는 실제로 경부선의 영업 운전에 사용되는 가선계이므로 전차선의 파단 등 안전 사고가 발생하여 경부고속철도 운행에 차질을 빚어서는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 집전시스템의 성능 달성 여부뿐만 아니라 KTX 가선계의 안전에 대하여 집중적으로 검토하고자 한다.

본 연구에서는 경부고속철도 시험선 구간에서의 터널/교량/지반구간 각각의 분포 및 사용된 가선계 현황을 분석하고, 선형 및 경사도를 고려하여 시제 열차의 시운전 속도를 정상적으로 실현할

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국기계연구원 선임연구원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원

수 있는 시험구간을 결정하였다. KTX 가선계 및 G7 팬터그래프의 사양을 제시하고, 집전 시험 시나리오를 정하여 각각의 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 검토하기 위한 집전 성능 기준(안)을 수립하고 시뮬레이션 결과로부터 350 km/h로 주행하는 경우에 대한 집전 성능을 분석하였다. 350 km/h로 주행하면서 안정적인 집전을 할 수 있는 장력의 크기를 검토해 보고 KTX 가선계에서의 장력 증가 방안에 대하여 검토하였다.

2. 시험선 구간 분석 및 시험 구간(안) 선정

본 연구에서 검토한 시험선 구간은 신희 고가에서 대전 정거장에 이르는 서울 기점 85 km에서 152 km이다. 표 2.1에서 볼 수 있는 바와 같이 시험선 구간은 터널 구간이 40 %, 교각이 39 %, 기타 지반 구간이 21 %로 구성되어 있다. 교각 및 터널 구간에서의 경간 길이는 대부분 40 ~ 50 m이었고, 지반 구간에서는 40 m에서 58.5 m까지 다양하게 사용되었다.

표 2.1 시험선 구간 분석 결과

구분	경간 길이 구성	비고
교각 구간	40m(229개), 50m(73개), 45m(12개), 48m(11개) 등	39% 차지
터널 구간	40m(245개), 48m(153개), 38m(22개) 등	40% 차지
지반 구간	40m(37개), 58m(31개), 54m(24개), 45m(11개), 63m(10개), 50m(8개) 등	21% 차지

G7 본선 시운전을 위해서는 350 km 로 10분 이상 달릴 수 있는 10 km 이상의 지반 구간을 선택하여야 하나 충분한 길이의 지반 구간을 확보할 수 없어 교각과 터널을 포함시켜서 집전 시험 구간을 선정하였다.

1 구간은 상행 운행시 시험 구간으로 서울 기점 97 ~ 111 km 지점이다. 구간길이는 14 km로 요구 시험 구간 길이로 10 km 이상을 확보하는데는 문제가 없을 것으로 보인다. 또한, 터널 점유 공간이 16%로 상대적으로 다른 구간에 비하여 작으므로 시험 구간으로 적절하다고 생각된다. 통과해야 할 터널의 개수도 2개 정도이다. 또한 지반의 경사도가 고등교(110.5 km 지점)로부터 풍세교 초입부(106 km 지점) 까지 10 %하향으로 기울어져 있고, 풍세교 초입으로부터 풍세교 중간부(103 km 지점) 까지 8 %하향으로 기울어져 있어서 상행시 열차 가속이 유리하다. 다만, 휴대 터널에서 풍세교 중간부(99 km-103 km 지점)까지 곡률 반경이 7,000 m인 곡선 선로를 이루고 있으나 곡률 반경이 크므로 거의 직선 구간이라고 간주하여도 무방하다고 생각할 수 있다.

2 구간은 하행 운행시 시험 구간으로 서울 기점 122 km-130 km 지점이 된다. 구간 길이는 8 km이나 상봉 터널 구간을 일부 사용하면 요구 시험 구간 길이로 약 10 km를 확보하는 데는 문제가 없을 것으로 보인다. 또한 상봉 터널에서 하행선 방향으로 즉 오송교 방향으로 지반의 경사도가 10 % 하향으로 기울어져 있으므로 상봉 터널에서부터 열차를 가속하는 데에 유리할 것으로 보인다. 또한, 이 구간은 선형 구간이다. 이들 두 시험 구간 사이의 거리가 2 km 이상이므로 적절히 분리되어 있음을 확인할 수 있다.

3. 집전 시험 내용

안전을 고려하여 항상 지장물 검사를 가장 먼저 수행하게 된다. 시험 속도에서 지장물이 없다

고 판단되면 후속 시험을 진행한다. 접촉력 및 이선율 측정은 시속 120 km/h부터 최고 속도까지 시험하게 된다. 접촉력 및 이선율을 측정함으로써 과도한 힘과 아크가 발생하는지를 확인하면서 본선 시운전을 수행한다. 팬터그래프 상승/하강 시험과 팬터그래프의 양력 시험은 200 km/h부터 최고 속도까지 시험하게 된다. 열차의 속도별로 수행하게 될 시험과 그 회수가 표 3.1과 같다.

표 3.1 집전 시험의 순서 및 회수

열차 속도 (km/h)	시험 순서(회)			비고
0	접촉력 (2)			
10	지장물 검사(1)			
20	지장물 검사(1)			
30	지장물 검사(1)			
60	지장물 검사(1)			
80	지장물 검사(1)			
100	지장물 검사(1)			
120	접촉력(스테거) + 이선율(지장물검사) (1)			
150	접촉력(스테거) + 이선율(지장물검사) (1)			
180	접촉력(스테거) + 이선율(지장물검사) (1)			
200	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (2)	상승/하강(1)	양력(2)	
230	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (2)	상승/하강(1)	양력(2)	
260	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (2)	상승/하강(1)	양력(2)	
280	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (2)	상승/하강(1)	양력(2)	
300	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (3)	상승/하강(1)	양력(3)	날개 조정 후 재시험 여부 검토
320	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (3)	상승/하강(1)	양력(3)	"
330	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (3)	상승/하강(1)	양력(3)	"
340	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (3)	상승/하강(1)	양력(3)	"
350	접촉력(스테거)+이선율(지장물검사) (3)	상승/하강(1)	양력(3)	"

4. 집전계 시뮬레이션

경부고속철도 시험선 구간에서 최고 운행 속도 350 km/h로 G7 시제 열차의 본선 시운전을 수행하기에 앞서 주어진 전차 선로 데이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행해 봄으로써 고속 주행시의 집전성능의 예측과 안전 문제의 발생 가능성을 점검하였다.

집전 성능을 예측하기 위하여 실현 가능한 두 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫째, 고속전철기술개발사업 시제 열차에 탑재된 G7 팬터그래프를 사용하여 KTX 가선계로부터 집전을 하는 것에 대하여 검토하였다. 둘째, 고속전철기술개발사업 시제 열차에 탑재된 G7 팬터그래프

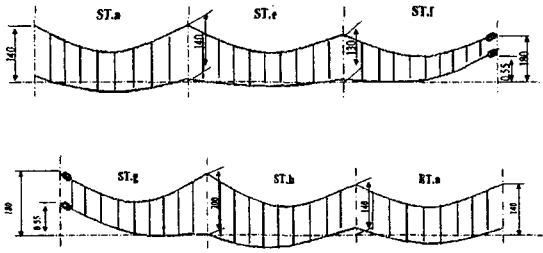
프를 사용하여 G7 가선계(KTX 가선계와 구조는 동일하나 장력이 26 kN으로 증가된 가선계)로부터 집전을 하는 것에 대하여 검토하였다. KTX 가선계에서는 여러 가지 표준 경간 길이가 설계에 사용되나 본 연구에서는 경부고속철도 시험선 구간의 분석을 통해서 가장 많은 빈도수를 보이는 40.5, 45.0, 49.5 m의 경간에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 집전성능 예측을 위해서는 시뮬레이션의 신뢰도가 검증된 일본 철도기술총합연구소(RTRI)에서 개발한 架線道(GASENDO)라는 프로그램을 사용하였다.

4.1 시뮬레이션 집전계의 사양

그림 4.1은 시험선 구간에서 고가교 및 터널에 많이 사용되는 40.5m, 45.0m, 49.5m의 경간에 대한 KTX 가선계의 개 구간(Open section)과 오버랩 구간(Overlap section)의 구성을 보여주고 있다. 그림 4.1(a)는 개구간 가선의 구성을 나타내고 있다. 각 경간 길이에 대해서 가고는 1.4m, 최대 사전 이도는 경간 길이의 1/2000로 하고 단지 행거 수만 다르다. 그림 4.1(b)는 오버랩 구간의 가선 구성을 나타내고 있다. 가선 A는 총 5경간으로서 ST.a는 3 경간, ST.e는 1 경간, ST.f는 1 경간으로 되어 있고, 가선 B는 총 5경간으로서 ST.g는 1 경간, ST.h는 1 경간, ET.a는 3 경간으로 되어 있다. 표 4.1에는 경간 길이 40.5m, 45.0m 및 49.5m에 대한 오버랩 구간의 구성 제원을 나타내었다.



(a) 개구간



(b) 오버랩 구간

그림 4.1 KTX 가선계의 개 구간 및 오버랩 구간 구성

표 4.1 오버랩 구간의 가선 구조 제원

		가선 A			가선 B		
		ST.a	ST.e	ST.f	ST.g	ST.h	ET.a
경간 40.5m	경간길이(m)	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5
	경간수	3	1	1	1	1	3
	행거수	6	6	6	6	6	6
경간 45.0m	경간길이(m)	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	경간수	3	1	1	1	1	3
	행거수	7	7	7	7	7	7
경간 49.5m	경간길이(m)	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5
	경간수	3	1	1	1	1	3
	행거수	7	8	7	7	8	7
	양단가고(m)	1.4/1.4	1.4/1.3	1.3/1.8	1.8/2.0	2.0/1.4	1.4/1.4
	상승길이(m)	-	-	0.05	0.05	-	-

UIC 코드 794 OR에서는 고속 가선계(> 300 km/h)의 경우 안정된 집전을 위하여 가선계에 작용하는 장력을 다음과 같이 권고하고 있다[1].

$$\text{최소 파동전파속도} > V_{\text{max}} + 40 \text{ m/s} = 350 + 40 \times 3.6 = 494 \text{ km/h}$$

이러한 권고 사항을 수용하기 위해서는 350km/h로 주행하기 위하여 25 kN 이상의 장력을 가해야 함을 의미하므로 G7 가선계의 전차선에 부여하는 장력을 26 kN으로 정하였다.

G7 가선계의 사양은 기본적으로 KTX 가선계의 사양과 유사하나 전차선의 장력이 26 kN으로 증가된 점이 차이를 보인다. 장력을 26 kN까지 증가시키기 위해서는 KTX 가선계에서 사용하는 Hard drawn copper 보다 강도가 좋은 선재의 개발이 필요하여 고속전철기술개발사업 1단계 “고속전차선 시스템 개발” 과제에서 Mg-Cu합금 선재를 개발한 바 있다. Mg-Cu합금 선재는 장력을 26 kN을 주기도 KTX 가선계에 적용하는 안전율을 만족할 수 있다. 표 4.2에는 KTX 및 G7 가선계의 특성 데이터가 나와 있다.

표 4.2 KTX 및 G7 가선계의 특성 데이터

주요부품	특성	단위	KTX/G7
전차선	재질		Hard drawn copper /MgCu합금
	피괴강도	N/mm ²	347.3/460.0
	안전율		2.2
	단면적	mm ²	150
	장력	kN	20/26
	선밀도	Kg/m	1.334
연수선	재질		Tin bronze/Br
	피괴강도	N/mm ²	644.4
	안전율		2.5
	단면적	mm ²	65
	장력	kN	14
	선밀도	Kg/m	0.605
행거선	종류/재질		Stranded wire/Br
	행거수		5,6,7,8,9
리선딩량	선밀도	kg/m	0.108
	등기질량	kg	0.9
금구	편위	mm	± 200

GPU 팬터그래프를 사용하여 주행속도 300km/h 이상으로 주행하게 되면 이선율이 높아지고, 평균 접촉력이 공력 증가로 인하여 경부고속철도 계약서에 나와 있는 평균 접촉력 상한치(200 N)를 초과하게 되어 경부고속철도 전차 선로 설계 기준을 만족하지 못하게 된다. 따라서 고속전철기술개발사업 「고속용 팬터그래프 개발」 과제에서는 이선율, 평균 접촉력 기준 등 성능 기준을 만족하면서 350 km/h로 주행할 수 있는 350 km/h 급 G7 팬터그래프를 개발하고 있다.

그림 4.2는 G7 팬터그래프의 등가 모델(안)으로서, 집전판, 집전판 지지부, 메인 프레임의 운동을 표현하는 3 자유도의 등가모델로 구성되며 각각의 집중 질량 사이에는 스프링과 댐퍼가 연결되어 있다. G7 팬터그래프의 동특성과 관련 데이터가 표 4.3에 나와 있다. 압상력은 팬터그래프의 메인 프레임 질량에 작용하는 정적 압상력 $70 \pm 20\text{N}$ 과 집전판 지지부에 작용하는 상 방향 공력으로 구성된다.

특히 공력은 주행 속도의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로 고속 운전시에는 총 접촉력 중에서 공력이 차지하는 비율이 크게 된다. 표 4.3에는 G7 팬터그래프의 등가 모델의 데이터가 나와 있다.

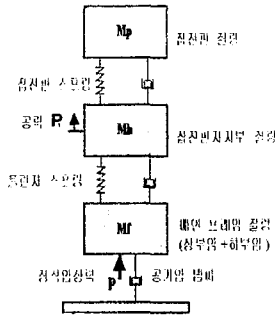


그림 4.2 G7 팬터그래프의 등가 모델

표 4.3 G7 팬터그래프의 특성 데이터

	등가질량 (kg)	스프링 상수 (N/m)	감쇄 상수 (Ns/m)	압상력 (N)	공력압상계수 (N/(Km/h) ²)
팬 헤드부	5.5	9,000	0.0	-	-
중간지시부	8.0	1,200	0.0	-	9.84e-4
메인프레임부	20.0	0.0	200	70± 20	-

4.2 집전 성능 해석

4.2.1 집전 성능 검토 기준(안)

집전 시스템의 동적 성능을 평가하기 위한 성능평가 기준(안)으로 다음과 같은 항목들을 설정하였다.

(가) 평균 접촉력

경부고속철도 계약서에 따르면 평균 접촉력은 100 초 이상의 평균값이 200 N을 초과할 수 없는 것으로 규정되어 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 얻은 평균 접촉력의 상한치로 200 N을 설정한다.

(나) 통계적 최소 접촉력

접촉력이 정규분포를 갖는다고 가정하면 접촉력의 평균 - 3 시그마는 99.75%의 신뢰도를 가지는 최소값을 의미한다. 이 값을 통계적 최소 접촉력이라고 부른다. 통계적 최소 접촉력은 이선과 관계가 깊다. 독일 DB 및 영국의 BR에서는 접촉력을 측정하여 이선 발생 여부를 판단한다. 독일에서는 접촉력 측정 시험을 통해 구한 통계적 최소 접촉력이 40 N 이상이면 아크가 발생하지 않았다고 보며[2], 영국에서는 통계적 최소 접촉력이 평균 접촉력의 33%를 초과하면 이선이 발생하였다고 본다[3].

KTX 가선계에서 KTX 열차가 1% 이하의 이선을 기준을 만족하면서 300 km/h로 주행할 수 있다는 것은 주지의 사실이다. 따라서, KTX 가선계에 대하여 GPU 팬터그래프가 300 km/h로 주행하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하여 얻은 통계적 최소값을 제한치로 사용할 수 있을 것이다.

표준 경간 길이 27 ~ 63 m까지 범위를 갖는 가선계에 대하여 가선도 프로그램을 사용하여 얻은 시뮬레이션 결과가 그림 4.3에 나와 있다. 통계적 최소 접촉력의 최소값은 경간 27 m에서 발생하며 그 크기는 45 N이다. 따라서 본 연구에서는 통계적 최소 접촉력의 하한치로 45 N을 사용한다.

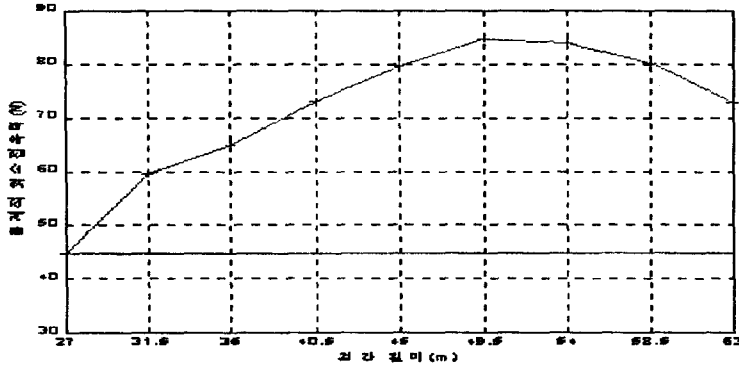


그림 4.3 경간 길이 별 최소 접촉력(개 구간)

(다) 최대 접촉력

최대 접촉력의 크기는 팬터그래프의 추종 성능 뿐만 아니라 전차선 및 집전판의 마모에 영향을 준다. 개 구간의 경우, 최대 접촉력의 제한치는 팬터그래프의 현수 장치의 양정(Stroke)을 고려하여 300 N으로 설정하였다. 오버랩 구간의 경우, 팬터그래프가 교차점을 통과할 때 전차선에 충격을 가하게 되므로 전차선에 국부 마모를 일으킬 수 있다. 오버랩 구간에서의 최대 접촉력 제한치는 KTX 가선계의 오버랩 구간에 대하여 GPU 팬터그래프가 300 km/h로 주행하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하여 얻은 최대 접촉력을 제한치로 설정하였다. 여기서 통계적 최대 접촉력 대신 시뮬레이션에서 얻은 최대 접촉력을 사용하는 이유는 교차 지점에서 충격력은 팬터그래프가 교차되는 전차선에 접촉하는 때에 발생하기 때문이다.

40.5m, 45m, 49.5m, 54m, 58.5 및 63m의 표준 경간으로 구성된 KTX 가선계의 오버랩 구간에 대해서 가선도 프로그램을 사용하여 주행 속도 300km/h로 시뮬레이션을 수행한 결과, 그림 4.4에서와 같이 경간 58.5m에서 가장 큰 최대 접촉력(444 N)이 발생하였으며 이것을 최대 접촉력의 상한치로 설정하였다.

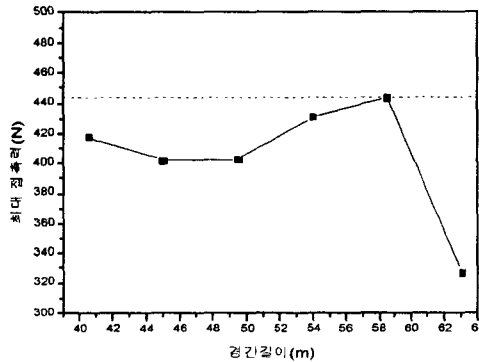


그림 4.4 경간 길이에 따른 최대 접촉력의 변화(오버랩 구간)

(라) 전차선 압상량

KTX 가선계의 곡선 당김 금구 위치에서 전차선의 최대 허용 압상량이 200mm를 제한되어 있으므로 본 연구에서는 전차선 압상량의 상한치로 200 mm를 설정하였다.

4.2.2 KTX 가선계 및 G7 팬터그래프의 집전성능 해석

(가) 개 구간 해석

경부고속철도 시험절차서(안)에 따르면 10 km 이상을 주행하면서 취득한 시험 데이터를 사용해 집전 성능을 평가한다. 집전 성능은 가선계의 경간 길이에 영향을 받게 되므로 시물레이션에 사용하는 경간 길이의 선택이 중요하다. 이는 사용 빈도수가 많은 경간 길이를 선택하여 시물레이션을 해야 함을 의미한다. 따라서 KTX 가선계에서 가장 많이 분포하고 있는 경간 길이 40.5 m, 45.0 m 및 49.5 m 구간을 G7 팬터그래프가 주행하는 경우에 대하여 시물레이션을 수행하였다.

그림 4.5는 경간 길이 40.5 m, 45.0 m 및 49.5 m의 개구간에서 주행하는 KTX 가선계 및 G7 팬터그래프의 집전성능 해석 결과를 보이고 있다.

G7 팬터그래프가 310~350 km/h로 주행했을 경우, 가선계의 안전과 직접 관련이 있는 전차선의 압상량과 평균 접촉력은 모든 속도에서 성능 기준을 만족함을 그림 4.5(a), 4.5(b)를 통해 알 수 있다. 특히 압상량은 상한치인 200 mm의 절반 밖에 안 되는 수준이었다. 반면에 이선과 관련이 있는 최대 접촉력과 통계적 최소 접촉력은 350 km/h 주행시 집전 성능 기준(안)을 만족하지 못함을 그림 4.5(c), 4.5(d)를 통해 알 수 있다. 여기서 집전 성능 기준(안)을 만족하지 못한다는 것은 300 km/h로 주행하는 GPU 팬터그래프의 집전 성능보다 상대적으로 나쁘다는 것을 의미하지 이선을 기준을 반드시 만족하지 못한다는 것을 의미하지는 않는다.

그림 4.5(c)에 경간 40.5 m, 45 m, 49.5 m에 대해서 최대 접촉력을 해석한 결과가 나와 있는데 경간 길이가 짧을수록 최대 접촉력은 커지는 경향을 보인다. 그림 4.5(c)에서 최대 접촉력을 해석한 결과, 성능 기준(안)을 만족하는 주행 속도가 각각 325 km/h, 325 km/h, 340 km/h이다.

한편, 그림 4.5(d)에 경간 40.5 m, 45 m, 49.5 m에 대해서 통계적 최소 접촉력을 해석한 결과가 나와 있는데 경간 길이가 짧을수록 최소 접촉력은 작아지는 경향을 보인다. 그림 4.5(d)에서 최소 접촉력을 해석한 결과, 성능 기준(안)을 만족하는 주행 속도가 각각 330 km/h, 340 km/h, 345 km/h이다.

(나) 오버랩 구간 해석

그림 4.6은 경간 길이 40.5m, 45.0m 및 49.5m의 오버랩 구간에서 주행하는 G7 팬터그래프의 집전성능 해석 결과를 보이고 있다.

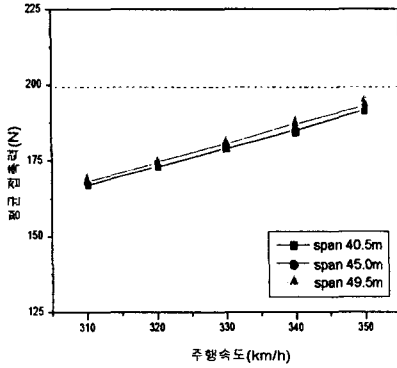
가선계의 안전과 직접 관련이 있는 전차선의 압상량은 모든 속도에서 성능 기준(안)을 만족하고 상한치인 200 mm의 절반 밖에 안 되는 수준이었다. 그러나 그림 4.6(a)에서 국부 마모와 관련이 있는 최대 접촉력은 350 km/h 주행시 성능 기준(안)을 만족하지 못했다. 350 km/h로 주행시 G7 팬터그래프의 최대 접촉력이 KTX 팬터그래프 보다 상대적으로 크다(최대 약 25% 정도). 제한된 회수의 G7 시운전에 의하여 국부 마모가 현저하게 발생할 가능성은 작다. 만약 G7 시운전이 350 km/h로 장기간 계속된다면 주기적으로 전차선 마모와 관련된 검측을 수행하여 마모의 진전 여부를 확인할 필요가 있다.

4.2.3 G7 가선계 및 G7 팬터그래프의 집전성능 해석

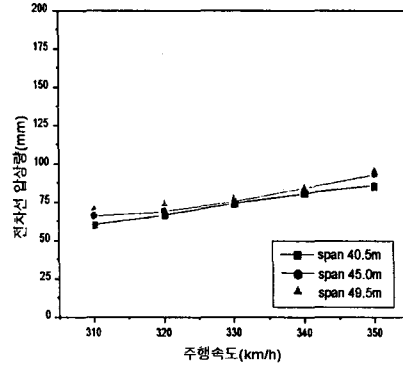
경간 길이 40.5m, 45.0m 및 49.5m의 G7 가선계 개 구간을 G7 팬터그래프가 350 km/h로 주행하는 경우에 대하여 시물레이션을 수행한 결과가 그림 4.7에 나와 있다.

평균 접촉력, 통계적 최소 접촉력, 최대 접촉력이 모두 집전성능 기준(안)을 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 G7 팬터그래프는 G7 가선계를 350 km/h로 양호한 집전 성능을 확보한 상태에서 정상적으로 주행할 수 있다고 판단된다.

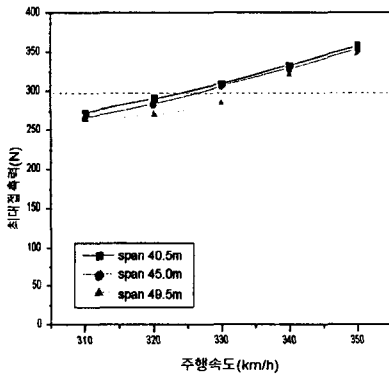
또한, KTX 가선계와 비교하여 G7 가선계가 장력 증가 이외에는 사양에 차이가 없음을 고려할 때 집전 성능은 전차선의 장력에 크게 의존함을 알 수 있다.



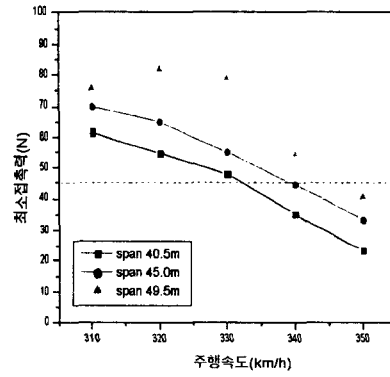
(a) 평균 접촉력



(b) 압상량

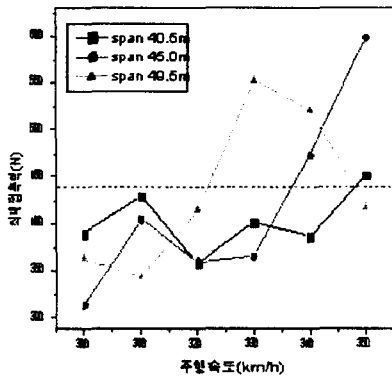


(c) 최대 접촉력

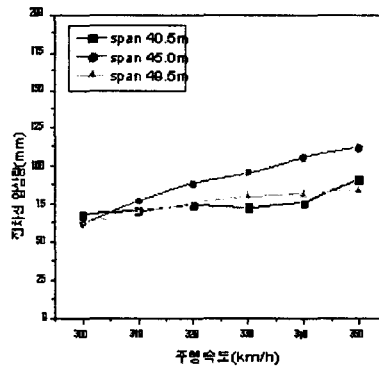


(d) 통계적 최소 접촉력

그림 4.5 KTX 가선계 및 G7 팬터그래프의 접촉력 해석 결과(개 구간)

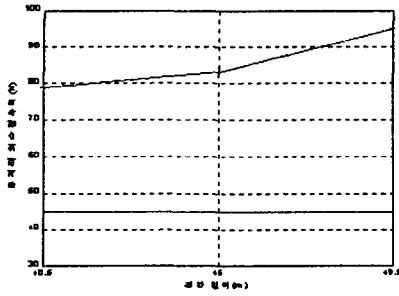


(a) 최대 접촉력

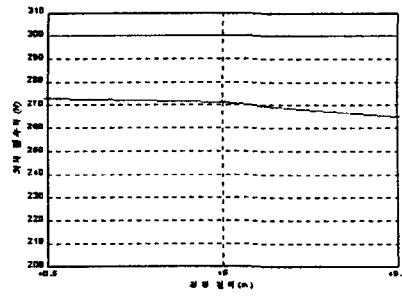


(b) 전차선 압상량

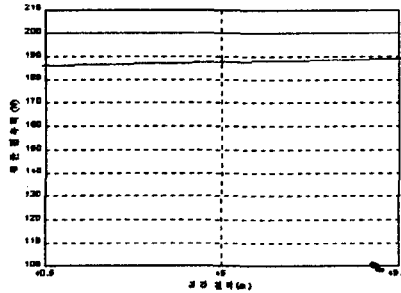
그림 4.6 KTX 가선계 및 G7 팬터그래프의 접촉력 해석 결과(오버랩 구간)



(a) 통계적 최소 접촉력



(b) 최대 접촉력



(c) 평균 접촉력

그림 4.7 G7 가선계 및 팬더그래프의 접촉력 해석 결과

5. 전차선의 동적 구조 강도

5.1 전차선 굽힘 응력

전차선의 동적 굽힘 응력은 다음 식으로 표현할 수 있다. 열차 속도가 파동전파속도와 같게 되면 이론적으로 굽힘 응력이 무한대가 됨을 알 수 있다[4].

$$\sigma \approx \frac{F}{2Z} \cdot \sqrt{\frac{EI}{T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(V/c)^2}} \quad (1)$$

여기서, F , Z , EI , T , V , c 는 접촉력, 단면계수, 강성, 장력, 주행 속도, 파동 전파 속도를 나타낸다. 식(1)에 KTX 가선계의 설계 데이터를 대입하여 구한 전차선의 굽힘 응력이 그림 5.1에 나와 있다. 그림 5.1에서 볼 수 있는 바와 같이 열차의 주행 속도가 파동 전파 속도의 0.8 배 이상이 되면 전차선의 굽힘 응력이 급격히 증가하게 된다. KTX 가선계를 350 km/h로 주행하게 되면 주행속도 대 파동전파속도의 비가 0.79가 되어 300 km/h로 주행할 때에 비하여 응력이 증가하게 되지만 응력이 급격히 증가하는 천이 영역이 아님을 알 수 있다.

한편, 프랑스, 독일, 일본에서 수행되었던 속도 향상 시험에서의 열차 속도 대 파동 전파 속도의 비율은 0.80 ~ 0.93의 범위를 가지고 있음을 표 5.1을 통해 알 수 있다. 이들 시험은 고속철도 선진국들이 자국의 기술력을 세계에 알리기 위하여 집전 성능에는 관심이 없고, 안전이 확보되는 상태에서 최고 속도로 주행하였던 시험이다. 따라서 이들 시험은 350 km/h로 정상 주행하려는 고속전철기술개발사업 본선 시운전과는 성격이 다르다. 하지만 이들 시험 사례로부터 알 수 있는

것은 G7 팬터그래프가 KTX 가선계를 350 km/h로 주행하게 되더라도 열차 속도 대 파동 전파 속도의 비가 0.79이므로 충분히 안전하다는 점이다. 따라서 제한된 회수의 G7 시운전에 의하여 피로 파괴가 유발되지 않을 것으로 생각된다.

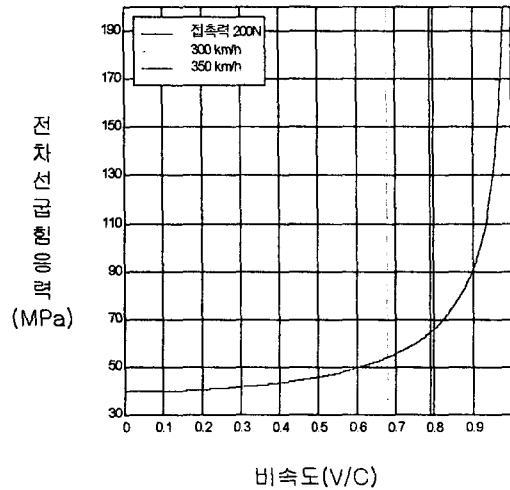


그림 5.1 전차선의 굽힘 응력

표 5.1 속도 향상 시험을 위한 전차선 장력 증가 사례

국가명	표준 장력 (kN)	시험 장력 (kN)	시험 속도(a) (km/h)	파동전파 속도(b) (km/h)	a/b	시험일자
프랑스[5]	20	28	482.6	523	0.92	1989. 12
프랑스[5]	20	33	515.3	553	0.93	1990. 05
독일[6]	15	21	406.9	504	0.81	1988. 05
일본[7]	14.7	19.6	425.0	530	0.80	1993. 12

5.2 전차선의 동적 특성

그림 5.2에는 프랑스 SNCF 가선계 등 유럽에서 사용되는 가선계에 대한 도플러 계수와 증폭 계수가 나와 있다[6].

증폭 계수 δ 는 반사 계수 γ 와 도플러 계수 α 의 비를 말하는 것으로 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\delta = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (2)$$

여기서

$$\gamma = \frac{\sqrt{(F_t \cdot m_t)}}{\sqrt{(F_t \cdot m_t)} + \sqrt{(F_f \cdot m_f)}} \quad (3)$$

m_t 는 조가선의 단위 길이당 질량(Kg/m), m_f 는 전차선의 단위 길이당 질량(Kg/m),

F_f : 전차선의 장력(N), F_t : 조가선의 장력(N)을 말하고,

$$\alpha = \frac{C - V}{C + V} \tag{4}$$

V : 주행 속도 (m/sec), C : 파동 전파 속도 (m/sec)를 말한다.

주행 속도가 파동 전파 속도에 근접하게 되면 증폭계수가 무한대가 되는 특성을 보인다.

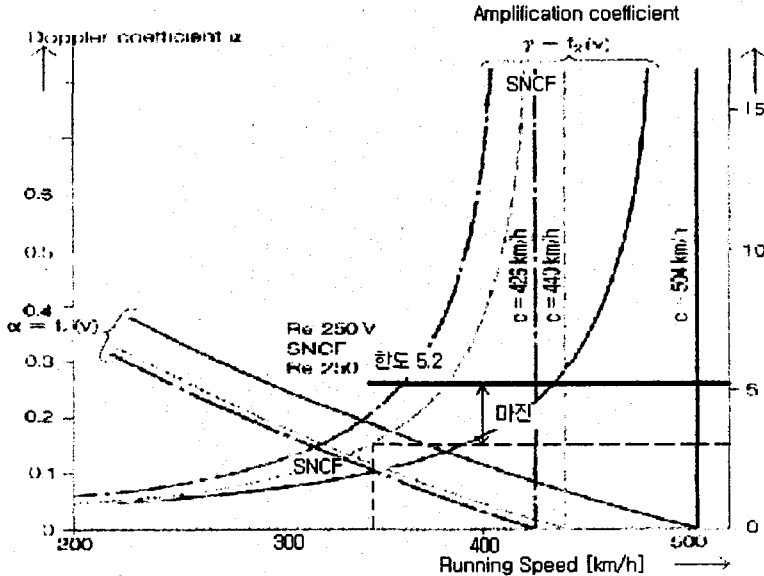


그림 5.2 SNCF 가선계의 도플러 계수와 증폭 계수

KTX 가선계와 전차선 장력이 같은 SNCF 가선계에서 380 km/h 까지 주행한 실적이 있다[5, 6]. 그 때의 증폭 계수는 5.2로 KTX 가선계를 350 km/h 로 주행할 때의 증폭 계수는 허용치의 약 50% 정도 밖에 되지 않음을 그림 5.2를 통해서 알 수 있다.

6. 가선계 장력 증가 방안

G7 팬터그래프가 KTX 가선계를 집전 성능을 만족하면서 350 km/h로 주행하기 위해서는 전차선의 장력 증가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 KTX 가선계를 수정하여 장력을 증가시킬 수 있는 방안을 다음과 같이 제안하였다.

- 전차선 소재 변경 : Hard drawn copper → Mg-Cu
- 추가로 설치되어야 할 장력 추의 수 : 3개
- 장력 추 지지 와이어의 길이 조정 : 1.44 m 만큼 짧게 조정
- 곡선 당김 금구 : 그대로 사용하여도 구조강도상의 문제는 없으나 독일의 장력 증가 사례와 같이 금구의 위치가 정확히 조정되어 있지 않으면 금구 지점에서 전차선의 손상이 발생할 수 있음
- 드로퍼 길이 조정 : 경간 길이의 2000분의 1이 되도록 조정

7. 결론

본 연구는 G7 시제열차가 경부고속철도 시험선 구간에서 시운전 시험을 하기에 앞서, G7 집전 시험에 의하여 경부고속철도 가선계에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지와 집전과 관련하여 안전에 문제 없는지를 검토하는 것을 목표로 수행하였다.

시험선 구간의 가선계를 분석하여 집전 시험 구간(안)을 선정하였다. 경부고속철도 시험열차서(안)에 따르면 집전시험 구간에는 교량과 터널을 포함하지 말 것을 요구하고 있으나 10 km 정도의 시험 구간을 확보하기 위하여 불가피하게 교량과 터널의 일부 구간을 집전 시험 구간으로 포함하였다.

시험 구간을 대상으로 집전 성능 시뮬레이션을 수행해 본 결과 350 km/h 주행시 안전에 관련이 있는 전차선의 압상량은 경부고속철도 가선계의 허용 기준인 200 mm의 절반 정도였고, 평균 접촉력은 허용 기준인 200 N 이하였다.

반면에 이선과 관련이 깊은 통계적 최소 접촉력과 최대 접촉력은 성능 기준(안)을 만족하지 못하였다. 여기서 성능 기준(안)을 만족하지 못한다는 것은 KTX 열차에 탑재한 GPU 팬터그래프가 300 km/h로 주행할 때의 이선 특성보다 나쁘다는 뜻이지 이선을 기준을 반드시 만족하지 못한다는 뜻은 아니다. 본 검토(안)에 설정한 성능 기준(안)을 만족하는 주행 속도는 시뮬레이션을 수행해 본 결과 325 km/h였다.

G7 팬터그래프가 집전 성능기준(안)을 만족하지 못하는 이유는 경부고속철도의 전차선 장력이 350 km/h로 영업 운전을 하기에는 부족한 것으로 보인다. 따라서 고속전철기술개발사업에서는 350 km/h로 영업 운행이 가능하도록 전차선의 장력 증가 등 가선계의 사양을 정비하였다. 또한, KTX 가선계에서의 전차선 장력 증가 방안을 검토하였다. 전차선의 장력이 26 kN까지 증가하게 되면 G7 팬터그래프가 350 km/h로 주행하여도 집전 성능 기준(안)을 만족함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

전차선의 국부 마모가 쉽게 발생한다는 오버랩 구간에서는 G7 팬터그래프에 의한 충격력이 KTX 팬터그래프보다 약 25% 컸다. 그러나 제한된 회수의 G7 시운전으로는 국부 마모가 발생할 가능성이 크지 않을 것으로 보인다.

가선계의 안전은 열차의 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비와 밀접한 관련이 있다. 전차선의 굽힘 응력은 그 비가 0.8 보다 클 때 급격히 증가하는 경향을 보인다. 경부고속철도 가선계에서 350 km/h로 주행을 하게 되면 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비가 0.79가 되므로 제한된 회수의 G7 시운전으로 인하여 전차선의 피로에 의한 손상이 발생하지 않을 것으로 보인다. 또한, KTX 가선계와 전차선 장력이 같은 SNCF 가선계에서 380 km/h까지 전차선의 압상량 기준을 초과하지 않고 안전하게 주행시험을 한 실적이 있으며, 프랑스, 독일, 일본에서 수행하였던 속도 향상 시험시의 주행속도 대 파동전파속도의 비가 최고 0.93까지 있었음을 볼 때 고속전철기술개발사업 본선 시운전에 의하여 가선계에 안전 사고가 발생할 것이라고는 생각하지 않는다.

한편, 집전과 관련된 본선 시운전에는 전차선과 팬터그래프 사이에 작용하는 접촉력과 이선과 관련된 이선율을 측정할 예정이므로 시운전을 수행하는 동안에도 과도한 접촉력이 걸리거나 과도한 이선이 반복적으로 발생하는 것은 감시가 가능하리라 본다.

후기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동 주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되고 있는 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] UIC Code 794 OR, "Pantograph-Overhead line interaction on the European high-speed network," International Union of Railways, 1996.1
- [2] DE-Consult 기술자문 자료, "Tests for High Speed Rail Development : Phase 2, On-line Tests," 1999
- [3] ERRI, "Simulation of the dynamic behavior of the overhead/pantograph system(two pantograph raised)," ERRI A 186/RP 1, 1996
- [4] 鐵道總合技術研究所, "電車線 と パンタグラフ의 特性," 1993
- [5] Korea TGV Consortium, "Core System Interfaces & Engineering Core Subsystems Description : Catenary," 1995
- [6] Wolfgang Harprecht, Friedrich Kiesling, Reinhard Seifert, "406.9 km/h Power Transmission in the Record Run of DB's ICE," Vol.86, No.9, 1988
- [7] 고속전철기술개발사업 2차년도 보고서, "고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발," 1998