

속도 향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전시스템의 성능에 관한 연구

A Study on Performance of TGV-K Current Collection System for the Speed-up

허 신*, 경진호*, 한형석*, 송달호*
S. Hur, J.H. Kyung, H.S. Han, D.H. Song

ABSTRACT

Described in this paper are the dynamic model and the dynamic performance of catenary-pantograph system for TGV-K(maximum operating speed of 300km/hr). Dynamic simulations showed that the system satisfies the performance criteria such as contact loss ratio, contact force and lift-off of the contact wire. It is also shown by the simulations that the dynamic behavior and contact performance of the system at the operating speed of 350 km/hr are found unacceptable. Design parameters of the catenary-pantograph system should be optimized for the speed-up of the TGV-K.

1. 서론

집전시스템의 성능은 고속전철의 운전속도의 한계를 결정하는 주요 요인중의 하나으로써, 최적 성능 기준은 안정된 집전 성능, 전차선과 판토히그래프 집전판의 마모 최소화, 속도 향상에 따른 소음 저감이다. 가선계의 설계는 일반적으로 매우 큰 투자를 요구하기 때문에 적은 유지보수 비용으로 장기적인 운영을 보장하는 성능을 갖도록 설계되어야만 한다. 그러므로 가선의 마모나 피로하중은 최소로 하면서 높은 집전 성능을 얻기 위해서는 가선-판토히그래프 시스템에 대한 최적화가 이루어져야 한다. 최적화를 달성하기 위해서는 시스템에 대한 신뢰성 있는 수치 모의해석 및 성능시험이 필요하며, 이러한 관점에서 가선과 판토히그래프의 수치 모의해석 기술은 고속전철의 개발에서 매우 중요한 부분이다. 수치 모의해석은 가선-판토히그래프 시스템의 동적 거동에 영향을 주는 많은 성능변수에 대한 분석 및 최적화에 경제적이고 신속하게 이용될 수 있다. 또한 실제 시험운전에서 수행하기 위험한 한계부하의 영향을 파악하는데 수치 모의해석을 이용함으로써 어떠한 위험없이 결과를 예측할 수도 있다.¹⁾

본 논문에서는 최고 운전속도 300km/h인 경부선에 도입될 TGV-K 차량의 집전시스템에 대해서 가선계의 전용해석 프로그램인 「가선도」²⁾를 이용하여 가선-판토히그래프 시스템을 모델링하고 수치 모의해석 및 동적 성능평가 수행한 결과를 설명한다. 또한 TGV-K 집전시스템의 동적성능을 개선하여 최고 운전속도 350 km/h인 한국형 고속전철의 집전시스템으로 사용하기 위해서, TGV-K 집전시스템의 운전속도를 350km/h로 증가시켰을 경우에 대한 동적 성능의 변화를 분석하고, 그에 대한 문제점을 파악하였다.

* 한국기계연구원, 신교통기술연구부, 정희원

2. TGV-K 집전시스템의 개요

그림 1은 TGV-K의 일반 구간에 설치되는 경간 63m의 단순 가선계로서, 조가선과 전차선 사이를 행거로 연결하여 전차선을 일정한 높이로 유지시키는 구조이다. 특히 경간 전체에 걸쳐 균일한 탄성을 유지하도록 사전 이도(pre-sag)를 준다. 적절한 양의 사전 이도는 주행 중에 판토크래프의 진동 폭을 적게 하는 동시에 전차선에 대한 접촉력과 그 변동을 적게 하여 이선을 방지하고 양호한 집전을 할 수 있게 한다.

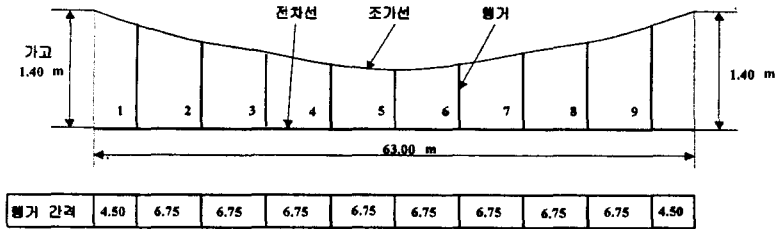


그림 1. 단순 가선계의 구조 및 제원

그림 2는 GPU 판토크래프의 구조로서 집전판, 상부암, 하부암, 지지프레임, 절연체 등으로 구성되어 있다. 집전판을 지지하는 강성이 큰 보우 스프링은 집전판에 작용하는 동적힘의 고주파수의 진동을 필터링하는 역할을 하며 ± 30 mm의 행정을 가진다. 또한 집전판 및 지지부를 2차로 지지하는 대형 플런저 스프링은 저주파수의 진동을 필터링하는 역할을 하며 가선의 압상량에 대응하는 ± 75 mm의 긴 행정을 가진다. 지지프레임과 하부암 사이에 설치된 스프링은 판토크래프에 일정한 정적 압상력을 제공하는 역할을 하며, 단방향 댐퍼는 판토크래프의 비상 하강 시 유연하게 이동할 수 있도록 한다.

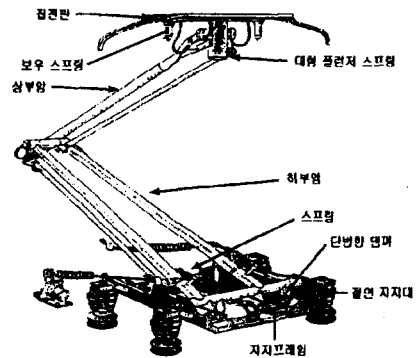


그림 2. GPU 판토크래프의 구조

3. 집전 시스템의 모델링

3.1 단순 가선계의 모델

모델링되는 가선계는 그림 1에서 보인 바와같은 TGV-K용의 단순 가선계로써 경간은 63m이고, 가고는 1.4m이며 사전 이도는 경간 길이의 1/2000이다. 각각의 행거 질량은 전차선과 조가선을 고정하는 클램프의 질량을 포함한다. 또한 가선 경계에서의 파동 반사의 영향을 감소시키고 해석 데이터의 통계학적 처리를 통해 신뢰성을 유지하기 위하여 판토크래프의 운행거리는 10 경간의 630m로 하였다. 표 1은 단순 가선계의 수치 입력 데이터이다.

곡선당김장치는 전차선을 잡아주는 이어부와 그것을 연결하는 당김금구부로 구성되어 있다. 곡선당김장치의 등가질량 m 은 식(1)과 같이 고려한다.

$$m = m_e + m_p / 3 \quad (1)$$

여기서, m_e 는 이어부의 질량이고 m_p 는 당김 금구부의 질량이다. 또한 스프링 상수는 전차선의 편위로 발생하는 횡장력과 당김금구의 설치 각도에 의해서 계산되는 값이고, 감쇠상수는 연결부의 마찰로 발생하는 값이다.³⁾ 표 2는 TGV-K용으로 설치되는 곡선당김장치의 수치 입력 데이터이

다.

표 1. 단순 가선계의 수치 입력 데이터

| 항목 | 선밀도 (kg/m) | 장력 (N) | 감쇠비* | 기타 | 항목 | 값 |
|-----|------------|--------|------|---------------------|------------|------|
| 조가선 | 0.605 | 14,000 | 0.01 | - | 경간(m) | 63 |
| 천차선 | 1.334 | 20,000 | 0.05 | - | 행거수 | 9 |
| 행거선 | 0.108 | - | - | 클램프 질량 (2 × 0.25kg) | 집중질량 간격(m) | 0.45 |

* 가선의 감쇠비는 가선의 내부 감쇠와 공기 마찰에 의한 감쇠를 시험에 의해서 측정된 값으로 참고문헌²⁾으로부터 인용한 값이다.

표 2. 곡선당김장치의 데이터

| | 등가질량 (kg) | 스프링 상수 (N/m) | 감쇠상수 (Ns/m) |
|--------|-----------|--------------|-------------|
| 곡선당김장치 | 0.61 | 218 | 0.23 |

3.2 GPU 판토품래프의 모델링

그림 3은 GPU 판토품래프의 등가 해석모델로서, 3 자유도의 집중질량 모델로 구성되어 있고 각각의 집중질량 사이에는 스프링과 댐퍼로 연결되어 있다. 표 3은 GPU 판토품래프의 등가 모델의 데이터를 나타내고 있다. 압상력은 판토품래프의 메인 스프링에 의해서 작용하는 정적 압상력 70N과 보우 지지부에 작용하는 상방향 공력과 메인 프레임에 작용하는 하방향 공력으로 구성된다.

특히 공력은 운전속도의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로 고속운전시에는 총 압상력중에서 공력이 차지하는 비율이 크게 된다. TGV-K의 GPU 판토품래프에서 작용하는 보우 지지부의 상방향 공력은 주행속도 300 km/h에서 약 131 N, 주행속도 350 km/h에서 약 180 N의 공력이 작용한다.⁴⁾

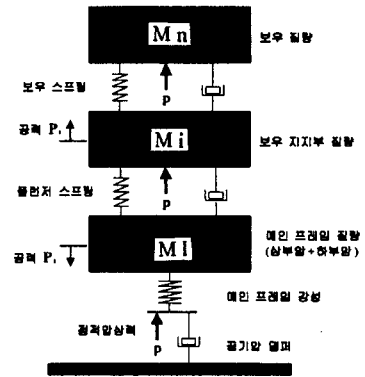


그림 3. GPU 판토품래프의 해석모델

표 3. GPU 판토품래프의 등가 해석모델

| | 등가질량 (kg) | 스프링 상수 (N/m) | 감쇠 상수 (Ns/m) | 압상력 (N) | 공력압상계수 (N/(km/h) ²) |
|--------|-----------|--------------|--------------|---------|---------------------------------|
| 팬 헤드부 | 8.1 | 9,000 | 6.0 | - | - |
| 중간지지부 | 8.0 | 1,500 | 0 | - | 0.00146 |
| 메인프레임부 | 23.1 | 6,876 | 140 | 70 | -0.00231 |

4. 동적 성능평가 기준

집전 시스템의 동적 성능을 평가하기 위해서는 성능평가 기준이 필요하며, 기준으로는 다음과 같은 항목들이 있다.

4.1 이선율

판토품래프와 접촉선은 항상 접촉된 상태에 있어야 하지만, 판토품래프의 이동에 따라 순간적

으로 비접촉이 발생하는데 이러한 현상을 이선이라고 한다. 일반적으로, 고속전철의 속도향상은 이선 특성에 제한을 받으며, TGV-K에서 이선율은 1%이하로 제한하고 있다. 이선율을 식으로 표시하면 식(2)와 같다.

$$\text{이선율 (\%)} = \frac{\sum(\text{이선시간})}{\text{주행시간}} \times 100 \quad \text{또는} \quad \frac{\sum(\text{이선하여 주행한 거리})}{\text{주행거리}} \times 100 \quad (2)$$

4.2 접촉력

접촉력의 크기는 집전 시스템의 동적 거동 및 유지 보수에 중요한 설계 기준이 된다. 접촉력이 증가하거나 감소함에 따라 전차선 및 집전판의 기계적 마모와 아크 발생에 의한 전기적 마모 사이에 상반되는 효과를 가지므로 마모를 줄일 수 있는 최적의 접촉력을 결정할 필요가 있다. 그리고 수치 모의해석 또는 시험에 의해서 얻어진 접촉력 데이터를 정확하게 평가하기 위해서는 통계학적인 처리를 할 필요가 있다. 즉 수치 모의해석 또는 시험 구간의 전 접촉력의 시간이력을 통계처리하여 접촉력의 평균값(F_{mean})과 표준편차(σ)를 구한다. 그리고 식(3)의 가우스 분포에 포함되는 값을 취하여 접촉력의 평가기준으로 삼는다.

$$(F_{\text{mean}} - 3\sigma) \leq F \leq (F_{\text{mean}} + 3\sigma) \quad (3)$$

위 가우스 분포식의 최소치와 최대치를 최소 접촉력, 최대 접촉력이라 부르고, 이선을 피하기 위해서는 식(4)를 만족해야 한다.

$$(F_{\text{mean}} - 3\sigma) \geq 0 \quad \text{또는} \quad (F_{\text{mean}} / 3) \geq \sigma \quad (4)$$

그림 4는 식(3), (4)의 접촉력 평가기준 식을 그림으로 나타낸 것이다.

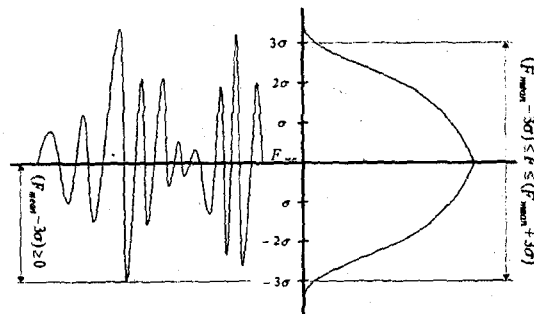


그림 4. 접촉력의 평가 기준

TGV-K의 가선-판토타이프 시스템에 대해서는 다음과 같은 접촉력 기준을 제시하고 있다.

- 평균 접촉력 $F_{\text{mean}} = 180 \text{ N}$
- 표준 편 차 $\sigma = 40 \text{ N}$
- 최소 접촉력 $F_{\text{min}} = 60 \text{ N}$
- 최대 접촉력 $F_{\text{max}} = 300 \text{ N}$

이 접촉력 기준을 만족할 경우, 운전속도 300km/h에서의 집전 성능은 이선률 1% 이하를 유지할 수 있으며, 집전판 또는 가선 마모도 적게 된다.⁵⁾

4.3 압상량

평균 압상량은 전차선의 상하 이동의 정도로서 전차선의 피로파괴, 유지보수와 관련된 성능지수이고, 전주 위치에서의 최대 압상량은 당김금구(steady arm)의 상승 높이를 결정하는 설계변수이다. 당김금구는 편위(staggering)에 의하여 수평력이 작용하므로 이 수평력이 압상력과 합성되어 압상량은 커지게 된다. TGV 가선계에서 300 km/h의 운전속도로 주행할 경우, 압상량은 약 8 cm이고, 340 km/h일 경우는 약 11.2 cm로 알려져 있다.

5. 수치 모의해석 결과

5.1 가선계의 정적 해석 결과

그림 5는 TGV-K 가선계를 모델링 한 후에 정적 해석을 수행한 결과이다. 조가선의 최대 처짐량은 경간 중앙에서 약 670mm이었으며, 미리 주어진 전차선의 사전 이도(경간 중앙점에서 31.5 mm)에 따라서 행거 길이가 결정되었다.

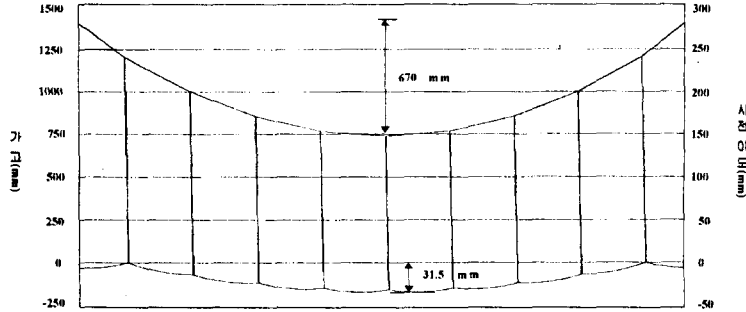


그림 5. 정적 처짐해석 결과

5.2 동적성능 해석 결과

표 4는 가선-판토크래프 시스템에 대해서 TGV-K의 최대 운전속도 300 km/h 경우와 운전속도를 350 km/h로 증가시킨 경우에 대해서 수치 모의해석을 수행한 결과이다. 10개 경간을 가지는 가선계 모델에서 첫 번째 와 마지막 경간은 고정되어 있는 조건이므로 실제의 가선설치 상황과는 차이가 있다. 그러므로 첫 번째 와 마지막 경간은 제외하고 접촉력 및 압상량의 통계학적 처리를 하였다.

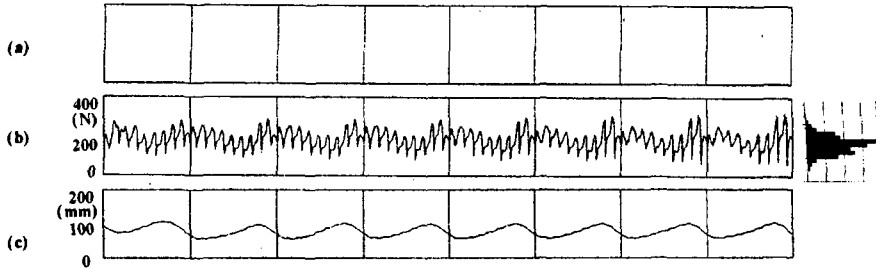
표 4. 접촉력 및 압상량의 수치 모의해석 결과

| 해석 항목 | 운전속도 | | |
|---------------|------------------|---------------|---------------|
| | 300(km/h) 기준치 | 300 (km/h) | 350 (km/h) |
| 평균 접촉력(N) | 180 | 181.3 | 221.6 |
| 접촉력의 표준편차(N) | 40 | 43.6 | 67.9 |
| 최대 접촉력(N) | 300 | 312.1 | 425.3 |
| 최소 접촉력(N) | 60 | 50.5 | 17.9 |
| 최대 압상량(cm) | - | 11.6 | 17.0 |
| 평균 압상량(cm) | - | 7.36 | 11.8 |
| 당김금구의 압상량(cm) | 40 | 7.4 | 13.9 |

최대 운전속도 300km/h의 경우, 평균 접촉력은 181.3N으로서 설계 기준치의 99.3%에 해당하고 표준편차는 43.6N으로서 설계 기준값의 91%에 해당한다. 최대 접촉력은 312.1N으로서 설계 기준치보다 4% 정도 많은 값이고 최소 접촉력은 50.5N으로서 이선 발생을 피하기 위한 설계 기준치의 84%에 해당하는 값이다. 당김금구의 압상량은 7.4cm로서 설계기준치 이내에 있고, 전차선의 평균 압상량은 7.36cm로서 TGV 가선계에서 300km/h의 운전속도로 주행시에 측정된 압상량인 8 cm와 근사한 값이다. 따라서 모델링된 TGV-K의 집전 시스템이 성능 기준을 잘 만족함을 알 수 있다.

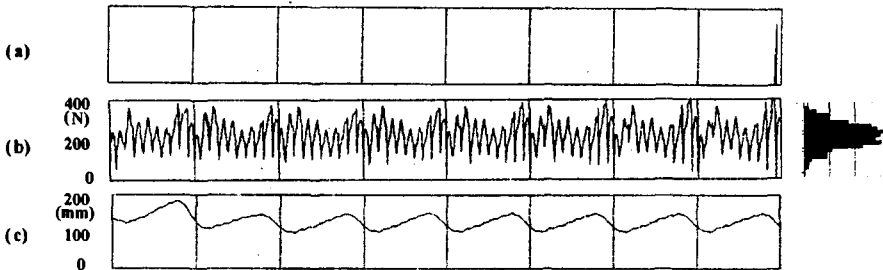
TGV-K의 운전속도를 350km/h로 증가시킨 경우, 평균 접촉력은 221.6N으로서 설계 기준치보다 23% 초과하고 표준편차는 67.9N으로서 설계 기준치보다 69%를 초과한다. 최대 접촉력은 425.3N으로서 설계 기준치보다 42% 초과하고 최소 접촉력은 17.9N으로서 설계 기준치의 30%로서 대단히 작은 값이다. 당김금구의 압상량은 13.9cm로서 기준치 이내에 있지만 전차선의 평균 압상량은 11.8cm로서 상당히 큰 값이다.

그림 6은 TGV-K의 최대 운전속도 300km/h 경우에 수치 모의해석을 수행한 결과이다. 그림 6(a)에서 수직선은 가선의 지지점(post)을 나타내고 수평선은 경간 거리를 나타내며 8개의 경간에 대해서 이선 발생이 없음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 접촉력의 파형을 보이고 있으며, 가선의 지지점 근처에서 최대 접촉력이 발생함을 알 수 있다. 또한 옆의 막대그래프는 접촉력의 도수분포를 보여주며, 피크는 가장 많이 발생한 접촉력의 크기를 나타낸다. 그림 6(c)는 전차선의 압상량을 나타내고 있으며, 가선 지지점의 2/3 지점에서 최대치를 보이고 있다.



(a) 이선 표시, (b) 접촉력, (c) 압상량
그림 6. 가선-판토히래프의 동적 특성(V = 300 km/h)

그림 7은 TGV-K의 운전속도를 350 km/h로 증가시킨 경우에 수치 모의해석을 수행한 결과이다. 그림 7(a)에서는 마지막 지지점에서 4msec 동안, 이선이 1회 발생하여 이선율이 약 0.1%로 계산되었다. 그림 7(b)에서는 가선의 지지점 근처에서 최대 접촉력이 발생함을 알 수 있다. 그림 7(c)에서 전차선의 압상량은 경간의 2/3 지점에서 최대치를 보이고 있다.



(a) 이선 표시, (b) 접촉력, (c) 압상량
그림 7. 가선-판토히래프의 동적 특성(V = 350 km/h)

이상의 수치모의해석 결과에 의하면, TGV-K의 최대 운전속도 300 km/h의 경우는 이선율, 접촉력, 압상량의 동적 성능평가 기준을 만족한다. 운전속도를 350 km/h로 증가시킨 경우는 이선율 1%인 기준을 만족하나, 접촉력의 성능기준은 만족하지 못함을 알 수 있다. 이와같은 결과는 상방향으로 작용하는 중간지지부의 공력이 운전속도 300km/h의 경우보다 약 30% 증가하여 평균 접촉력 및 표준편차가 증가했음을 예측할 수 있고, 또한 파동전파속도의 증가로 인하여 질량 집중부(판토히래프 질량, 가선계의 당김금구 질량 등)에서의 파동반사가 표준편차를 증가시킨 원인으로 생각된다. 따라서 최대 운전속도 350 km/h인 한국형 고속전철의 집전시스템을 위해서는 TGV-K 가선계의 구조 변경 또는 판토히래프의 동적 특성, 즉 공력을 감소시키거나 질량 집중부를 경량화하여야 한다.

6. 결론

경부선에 도입될 최고 운전속도 300km/h인 TGV-K의 집전시스템에 대해서 가선계 해석의 전용

프로그램인 「가선도」를 이용하여 수치 모의해석 및 동적 성능을 평가하였다. 또한 TGV-K의 집전시스템에 대해서 운전속도를 350 km/h로 증가시켰을 경우에 대한 동적 성능의 변화를 파악하고, 한국형 고속전철의 집전시스템을 설계하기 위한 문제점을 파악하였다.

최고 운전속도 300km/h인 TGV-K 집전시스템에 대해서 수치 모의해석을 수행한 결과, 평균 접촉력은 설계 기준치의 99.3%, 표준편차는 설계 기준치의 91%, 최대 접촉력은 설계 기준치의 104%, 최소 접촉력은 설계 기준치의 84%에 해당하는 값이다. 그리고 당김금구의 압상량은 7.4cm로서 설계기준치 이내에 있다. 따라서 모델링된 TGV-K 집전시스템은 동적 성능평가 기준을 만족함을 확인할 수 있었다.

TGV-K의 운전속도를 350km/h로 증가시켜 수치 모의해석을 수행한 결과, 평균 접촉력은 설계 기준치보다 23% 초과하고 표준편차는 설계 기준치보다 69%를 초과한다. 최대 접촉력은 설계 기준치보다 42% 초과하고 최소 접촉력은 설계 기준치의 30%로서 대단히 작은 값이다. 따라서 집전시스템의 동적 특성은 성능 기준을 만족하지 못함을 알 수 있었다. 최대 운전속도 350 km/h인 한국형 고속전철의 집전시스템을 위해서는 TGV-K 가선계의 구조 변경 또는 판토히그래프의 동적 특성, 즉 공력을 감소시키거나 질량 집중부를 경량화하여야 한다.

참고문헌

1. Dr.-Ing, Klaus Becker etc(1995), "Systematic Development of a High-speed Overhead Contact Line", Railway Technical Review No. 3-4, pp. 3-11
2. 철도종합기술연구소, "가선도-s1 Ver.1 매뉴얼"
3. 철도종합기술연구소(1996), "전차선과 판토히그래프의 특성", 연우사 출판
4. G.Galeotti, F.Toni(1992), "Dynamic Optimization at Span and Dropper Frequency of a Railway Pantograph for High Speed Running", pp. 8.31-8.43
5. 배정찬 외 22명(97), "판토히그래프 개발(1차년도 연차보고서)", 한국생산기술연구원 보고서