

가선추증성 향상을 위한 틸팅차량용 틸팅판토그래프 기술연구

이수길*, 한성호*, 한영재**, 이우동**, 송용수**

*한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, **고속철도기술개발사업단

The Study of Tilting Pantograph of Tilting Train for Improvement Catenary Control

Su-Gil Lee*, Seong-Ho Han*, Young-Jae Han**, Woo-Dong Lee**, Yong Soo Song**
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 판토그래프는 전차선(catenary)으로부터의 전류를 차량에 전달하는 장치로서 전동차 지붕 위에 설치되어 있다. 판토그래프의 설계 목표는 고속 및 다양한 환경 조건하에서 연속적이고 일정한 량의 전류를 차량에 전달하도록 하는 것이다. 열차가 고속화될수록 전류의 흐름이 중단되는 이선, 접촉선과 판토그래프 집전판의 마모, 공력 소음 등이 큰 문제로 대두되며, 이들 문제들이 고속용 판토그래프의 설계 기술에서 중요시되고 있다. 특히 이선은 동력 전달이 중단될 뿐만 아니라 이선 시에 발생하는 아크로 인한 마모 증대, 통신 장애를 일으킨다. 유럽과 일본에서는 그러한 문제를 인식하고 고속용 판토그래프에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 또한 저속전철이나 고속전철을 운행하는 나라에서는 기존의 가선계를 그대로 이용하면서 고속화를 달성하기 위하여 기존 가선계에 대한 최적의 판토그래프 설계에 노력을 기울이고 있다. 본 논문에서는 국내 기존선 고속화에 필요한 최고속도 180km/h급 틸팅차량시스템의 핵심 구성요소인 판토그래프 제어기술에 대한 연구를 통하여 보다 안전한 틸팅차량용 판토그래프사양 개발하는데 목적이 있다.

1. 서 론

판토그래프의 상하운동을 하는 프레임 구조에서 상부는 크기나 형상의 차이가 있긴 하지만 기본적으로는 같다. 그러나, 동작 방식의 차이에 따른 상승·하강동작의 구조부분은 다르다. 공기상승 자동 하강식은 상승 및 하강 동작속도를 제어하는 관계로 스프링상승 공기하강식보다 구성부품이 많다. 공기상승 스프링 하강은 공기상승 자동 하강식과 거의 유사하며, 상승·하강 동작 속도 제어가 가능하고 구성부품이 적다.

오늘날 전 세계에서 사용되는 판토그래프는 거의 대부분 수동형 시스템으로 볼 수 있다. 가장 널리 이용되고 있는 판토그래프의 기본 구조는 대칭형 구조 판토그래프 그림 1(a)(b)와 그의 변형인 비대칭형 판토그래프이다(그림(b)). 또한 90년대 후반에 일본에서 개발한 Telescope 형도이 있다.

대칭형 판토그래프는 상대적으로 중량구조이면서 소음에 불리한 점이 있으나 대칭구조이므로 설계가 용이한 장점이 있다. 비대칭형 판토그래프 구조의 이점은 상대적으로 경량 구조면서도 큰 기계적 강성을 갖고 접히는 공간은 적으나 넓은 범위의 가선계 높이에 이용 가능하다는 것이다. 또한 중요 파라메타 즉, 예로써 암의 길이를 약간 수정하면 다양한 조건에 쉽게 적용할 수 있다. 그리고 경량구조로 소음저감에도 큰 효과가 있다. 다만 비대칭구조이어서 고도의 설계기술을 요구한다. 그림 1(a)(b)는 대칭형 판토그래프인 diamond type 및 crossarm type 판토그래프의 모습을 나타내고, 그림 1(c)는 single arm type 판토그래프의 대표적인 모습을 나타낸다.

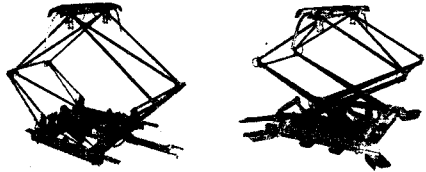


그림 1(a)(b). 판토그래프의 형식

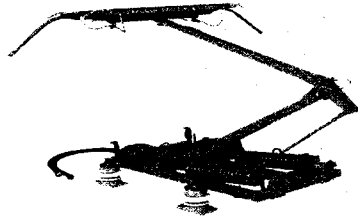


그림 1(c). 판토그래프의 형식

곡선에서의 원심력에 의한 차량 전복 및 승차감 저하 염려 때문에 열차의 속도를 높이려면 곡선에서는 적절한 Cant를 주거나 곡선을 직선에 가깝게 펴야 하는데 이는 많은 비용이 소모된다. 따라서 선로 측에 대책을 세우는 대신 차량 측에 적절한 대책, 즉 곡선에서는 차량이 진자(추)처럼 선로 내측으로 기울게 한다면 선로에 캔트를 주는 것과 똑같은 효과를 얻을 수 있어 적은 비용으로 열차속도를 높일 수 있다는 아이디어를 이용하여 제작된 차량이 틸팅 차량(Tilting train)이다.

2. 판토그래프 구조

틸팅 차량에 설치되는 판토그래프는 집전판과 접촉선 사이에 적절한 접촉을 유지할 수 있도록 틸팅되는 차체와 반대방향으로 자동적으로 기울도록 하는 틸팅 장치에 설치된다. 틸팅차량은 곡선부를 일반차량보다 높은 속도로 주행하는 차량이다. 틸팅은 곡선부 주행시 차체를 곡선의 안쪽으로 기울게 하는 기술로써 곡선부를 주행함으로써 발생하는 원심가속도를 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시켜 결과적으로 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다. 차량에 이와 같은 틸팅 기술을 적용하면 승차감의 향상뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가시킬 수 있게 되므로 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가감속 빈도도 줄어들어 그 만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 된다. 틸팅은 곡선부에서 약 30% 정도의 속도향상을 가능하게 해준다. 일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도여건이나 차량의 성능에 따른 제한보다

는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다.

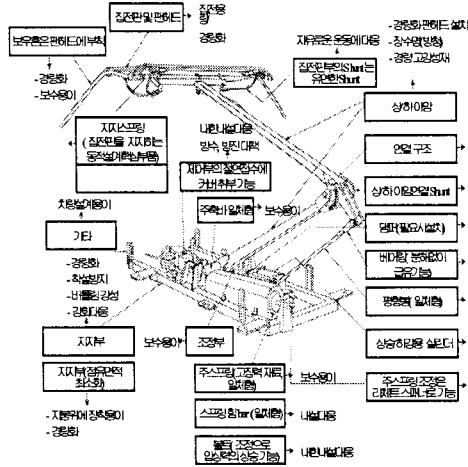


그림 2. 판토그래프의 구조

즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정 값을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다. 위와 같은 킬팅의 원리에 따라, 킬팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 위력을 많이 발휘할 수 있다. 킬팅차량을 적용하면 기존선에서 차량의 속도를 30% 정도 향상시킬수 있으나, 전력공급 측면에서는 차량이 기울기 때문에 안정적으로 전력을 공급할 수 없고 이선이 많이 발생할 수 있다. 가선과 판토그래프는 서로 밀접한 구조로 하나의 진동계로 구성이 되어야 한다. 집전시스템의 성능은 고속전철의 운전속도의 한계를 결정하는 주요 요인중의 하나로써, 최적의 성능기준은 안정된 집전 성능, 전차선과 판토그래프 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-판토그래프 시스템에 대한 최적화가 이루어져야 한다. 최적화를 달성하기 위해서는 시스템에 대한 신뢰성 있는 시뮬레이션 및 성능 시험이 필요하며, 이러한 관점에서 가선과 판토그래프의 시뮬레이션 기술은 기존선 고속 킬팅열차(TTX)에 사용되는 가선 선정 및 판토그래프의 개발에서 매우 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

기존선 구간에서 고속 킬팅열차가 설계속도 200 km/h 로 안전한 주행을 하기 위해서는 사용될 가선 및 판토그래프에 대한 시뮬레이션을 수행하는 것이 반드시 필요하다. 시뮬레이션을 통해 주행시험의 기간 및 비용을 단축할 수 있으며 집전계의 동적 성능을 예측하여 사고 및 집전계의 안전에 대비할 수 있다.

기존선 고속 킬팅열차는 출발에서 설계속도 200 km/h 까지의 모든 속도에서 추진 및 보조동력에 필요한 전류를 집전할 수 있는 성능을 가져야 한다. 또한 모든 운행 속도에서 뿐만 아니라 터널의 출입시, 개활지 및 터널에서의 열차 교행시 등의 조건하에서 안정한 동적 특성을 가져야 하며 주행시간의 5.0 % 이상의 이선이 발생하지 않아야 한다. 그리고 판토그래프는 곡선 통과시 대차의 킬팅 메커니즘과 연동으로 작동하여 주행성능을 향상하여야 한다

그림 3은 판토그래프 집전판의 허용 잔여너비와 전차선의 횡변위와의 관계를 설명하고 있다. 판토그래프 집전

판의 빗금친 부분인 Wd는 집전이 가능한 범위를 나타내고, 그 외는 전기적인 절연이 되어 있어 집전을 할 수 없는 부분이다. ①은 집전판의 균일한 마모를 위해서 형성된 전차선의 편위로서 집전판 중앙에서부터 횡변위 Q가 발생한다는 것을 의미한다. ②는 바람에 의해서 발생하는 전차선의 횡변위 N을 의미한다. ③은 전주의 변형으로 발생하는 전차선의 횡변위 r을 나타낸다. ④는 차량의 동적운동 및 캔트 등에 의해서 발생하는 전차선의 횡변위 M을 의미한다. 집전이 가능한 전차선의 운동 범위는 위에서 발생된 전차선의 횡변위의 합 M+Q+N+r이 판토그래프의 반폭 Wd/2보다 작거나 같아야 한다.

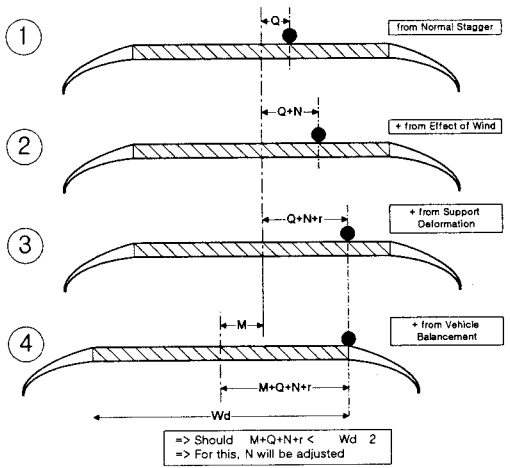


그림 3 전차선과 집전판의 잔여 너비사이의 관계

판토그래프의 유효 운전영역(Working Zone)는 마모 슬립판과 연결 슬립판을 합친 너비에 해당한다.

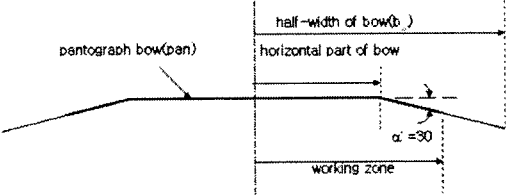


그림 4 판토그래프의 유효 운전영역

-Bow profile은 1450 mm, 1600 mm, 1950 mm 세가지 종류가 있다. 이 프로파일에 선정에 의해 가선추종성 영향을 받고 있다.

판토그래프와 접촉선은 항상 접촉된 상태에 있어야 하지만, 판토그래프의 이동에 따라 순간적으로 비접촉이 발생하는데 이러한 현상을 이선이라고 한다. 일반적으로, 고속전철의 속도향상은 이선 특성에 제한을 받으며, G7 고속전철의 집전계 사양에서 이선율은 1%이하로 제한하고 있다. 이선율을 식으로 표시하면 식(3.8)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{이선율}(\%) &= \frac{\sum(\text{이선시간})}{\text{주행시간}} \times 100 \\ &= \frac{\sum(\text{이선하여 주행한 거리})}{\text{주행거리}} \times 100 \end{aligned}$$

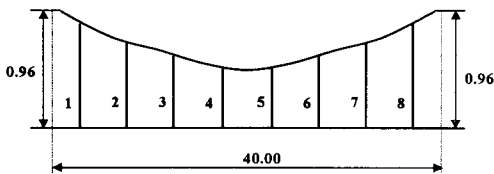
3. 판토그래프와 가선 인터페이스

열차가 운행중일 때 판토그래프는 선로조건, 차량특성,

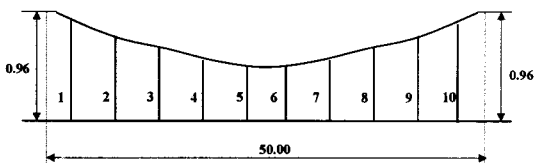
기후상태 및 열차속도 등에 따라 여러 위치에 존재할 수 있으며, 또한 전차선도 설치상태, 바람의 조건 등에 따라 다양한 위치로 움직여 질 수 있다. 그러나 어떠한 경우든 열차가 안전하게 집전하기 위해서는 판토품그래프 집전판이 전차선을 벗어나서 운행하여서는 안 된다.

이를 위하여 최악조건하에서 전차선과 판토품그래프의 상대적인 좌우 측면 위치를 검토하여야 하며, 궤도, 환경, 차량, 판토품그래프 및 전차선로의 설계기준(Design Criteria)이 이미 결정된 상태에서는 전차선로의 경간 길이를 제한하는 방법밖에 없다. 따라서 그림 5의 기준선의 집전계 시뮬레이션에 사용되는 경간 길이 40.0m, 50.0m 및 60.0m의 단순 가선계에서 판토품그래프가 주행할 경우, 어떤 경간 길이가 가장 우수한 집전 성능을 나타내는지 예측하므로써 가선의 제원 결정을 하게 된다. 가선계의 가고는 0.96m이며 최대 사전이도(pre-sag)는 경간 길이의 1/2000이다. 사전이도는 경간 전체에 걸쳐 균일한 탄성을 유지하도록 하여 주행 중에 판토품그래프의 진동 폭을 적게 하는 동시에 전차선에 대한 접촉력과 그 변동을 적게 하여 이선을 방지하고 양호한 집전을 할 수 있게 한다.

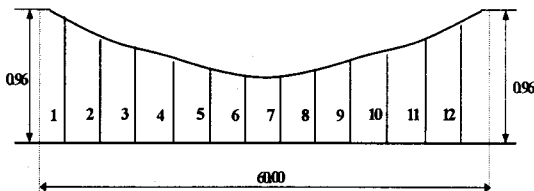
기준선 구간의 전차선로는 철도청에서 이미 사용 중인 가고 960 mm의 가선 시스템을 그대로 활용하면서 전차선, 조가선 장력을 각각 12.0 kN으로 하고 전차선과 조가선의 재료는 Cu110mm², Bz65mm²로 설계된 시스템을 사용한다. 이 가선 시스템에서 전차선 및 조가선의 안전도 및 수명, 정적 킴플라이언스 등의 계산은 이미 호남선 전철화 보고서에 제시되었다.



(c) 40.0m 경간



(b) 50.0m 경간



(a) 60.0m 경간

그림 5 해석 대상의 가선계 구조

표 1은 열차속도 200.0 km/h로 경간 길이 40.0 m, 50.0 m 및 60.0 m의 전차선로를 주행할 경우, 평균 접촉력, 접촉력의 표준편차 및 곡선당김금구의 압상량을 계산한 결과이다. 기준선 가선계의 곡선당김금구의 압상량은 100 mm로 제한되어 있기 때문에 그 부분에서의 압

상량 여유율을 2정도로 보았을 때 약 50 mm의 압상량을 초과하지 않으면 문제가 없을 것으로 판단된다. 경간 길이 40.0 m일 경우, 평균 접촉력 대 표준편차의 비가 20.0 % 이내이다. 곡선당김금구의 압상량은 50 mm를 초과하므로 양호한 집전이 가능하지 않을 것으로 판단된다.

경간 길이 50.0 m일 경우, 평균 접촉력 대 표준편차의 비가 거의 20.0 % 이내임을 알 수 있다. 곡선당김금구의 압상량은 50 mm이내에 있으므로 양호한 집전이 가능할 것으로 판단된다.

경간 길이 60.0 m일 경우, 평균 접촉력 대 표준편차의 비 20.0 %를 초과한다. 그리고 곡선당김금구의 압상량은 50 mm를 초과하므로 양호한 집전이 가능하지 않을 것으로 판단된다.

따라서 설계속도 200 km/h까지 주행하는데 집전 성능이 가장 양호할 것으로 예측되는 경간길이는 50 m로 판단 된다.

표 1 경간길이 변화에 대한 집전성능(V=200 km/h)

Length of Span (m)	Fmean (N)	S.D. (N)	S.D./Fmean (%)	Uplift of Bracket (mm)
40	114	19	17	51
50	117	25	21	39
60	118	29	25	58

4. 결론 및 향후연구계획

본 논문에서는시뮬레이션 결과로 결정된 표준 경간 50 m의 기준선 가선계의 기본사양과 판토품그래프의 설계변수 변화를 토대로 집전성능의 영향을 해석한 결과, 판토품그래프의 집전성능이 경간 50m에서 가장 양호한 결과를 도출하였다. 이결과를 토대로 기준선 틸팅차량의 판토품그래프 설계에 반영하여 200km/h급 틸팅판토품그래프 설계를 수행하였다.

참고문헌

- [1] Dr.-Ing, Klaus Becker etc, "Systematic development of a high-speed overhead contact line", Railway Technical Review No. 3-4,
- [2] Schneider, R., Pantographs for Tilting Trains, Colloquium digest, IEE, Issue 509, 1998
- [3] 호남선 전철화 타당성 조사 및 기본 계획, 한국철도기술연구원, 2001
- [4] 기준선 고속 틸팅 열차 차량 시스템 요구사항, 한국철도기술연구원, WBS No : 2100-D001 Rev.A