

기존선고속화를 위한 틸팅차량용 판토틀라프 설계

*이수길, 한성호, 유원희, [†]경진호
 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, [‡]한국기계연구원

Design of Tilting Train Pantograph for Conventional Rail Speed-Up

Su-Gil Lee, Seong-Ho Han, Won-Hee You, [†]Jin-Ho Kyoung
 Korea Railroad Research Institute, [‡]Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract - This paper describes the pantograph design result for tilting train at conventional railway. EMU(Electrical Multiple Unit) Tilting Train is important tilting pantograph. Tilting train pantograph should be operated to commercial service speed 180Km/h of 200Km/h at KNR upgrade railroad. This specification pantograph tested using catenary-panto dynamic simulation

1. 서 론

물류가 국가 경제에 미치는 영향은 경제가 발전할수록 더욱 증대되고 있다. 그러나 도로를 통한 수송은 늘어나는 수송수요를 감당하지 못하고 날이 갈수록 그 경제성이 떨어지고 있는 실정이다. 한편 정부도 이와 같이 심각한 수송수요를 도로교통만으로는 만족시킬 수 없다는 판단하에 경부선을 중심으로 1968년 95km/h, 1969년 110 km/h, 1983년 120km/h, 1985년 135km/h (표준선 구간 140km/h)로 점진적으로 속도향상을 위해 노력하고 있다. 현재 국내의 기존선 고속화 방법은 하부구조에 비해 투자비가 적게들며 곡선부를 고속으로 운행할 수 있는 틸팅차량의 도입과 이와 관련된 하부구조 및 판토틀라프 개발 및 제어하는 방법이다. 이와 같은 배경하에서 추진되는 180 km/h급 기존선 고속화용 차량개발의 기술적 요체가 되는 틸팅 주행시스템의 판토틀라프 개발 및 제어기술이 필수적으로 이루어져야 한다. 본 논문에서는 국내 기존선 고속화에 필요한 최고속도 180km/h급 틸팅차량시스템의 핵심구성요소인 판토틀라프에 대한 사양결정과 개념설계를 연구하였으며, 시뮬레이션을 통하여 사양의 타당성을 검증하였다.

2. 틸팅 차량용 판토틀라프 설계 개념

2.1 판토틀라프 설계 개념

판토틀라프는 전차선(catenary)으로부터의 전류를 차량에 전달하는 장치로서 전동차 지붕 위에 설치되어 있다. 판토틀라프의 설계 목표는 고속 및 다양한 환경 조건하에서 연속적이고 일정한 량의 전류를 차량에 전달하도록 하는 것이다. 열차가 고속화될수록 전류의 흐름이 중단되는 이선, 접촉선과 판토틀라프 집전판의 마모, 공력 소음 등이 큰 문제로 대두되며, 이들 문제들이 고속용 판토틀라프의 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 판토틀라프에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 또한 저속전철이나 고속전철을 운행하는 나라에서는 기존의 가선계를 그대로 이용하면서 고속화를 달성하기 위하여 기존 가선계에 대한 최적의 판토틀라프 설계에 노력을 기울이고 있다. 고속용 판토틀라프는 보통의 경우 동력차 지붕에 설치되어 가선을 따라 차량과 동일한 속도로 이동하

면서 가선으로부터 전력을 받아 동력차의 주변압기에 공급해 주는 차량의 핵심 부품이다. 고속열차 판토틀라프는 180km/h 이상의 고속 주행시 돌발적인 공기저항 증가 등을 고려한 설계가 요구되는데, 전차선과 판토틀라프 사이에 양질의 접촉을 확보하여 안정된 전력 인입을 유지함과 동시에, 접촉면의 마모를 최소화하여야 한다. 가선계의 강성 불균일, 전차선의 미소 요철, 드로퍼 연결지점의 강성변화, 지지 Fitting 부위의 경점, 주행 중 차량의 진동 등이 이선의 원인이 되고 있다. 국내의 경우 G7 판토틀라프는 이선율을 1% 이하로 억제하고 있다. 이는 판토틀라프 1대로 모든 소비전력을 공급할 경우 판토틀라프의 파동전파영향을 받지 않아 이선율이 낮아도 충분히 가선을 추종할 수 있다. 다 판토틀라프 차량의 이선율은 주변압기의 편차, 집전소음, 전파장애 등을 고려하여 5~10% 정도로 억제하는 것이 바람직하다. 판토틀라프는 스프링계와 질량에 의한 주파수 특성을 지니고 있어, 속도가 높게되면 가선의 높이차와 진동에 따른 변위에 대한 추종성이 나빠지게 되어 접촉력의 변동이 크게 발생되고, 결국 접촉력이 떨어지기 시작하는 것이 일반적인 이선이지만, 열차가 고속영역으로 들어가, 가선의 파동전파속도에 가까워지면 큰 이선이 발생하게 된다.

가선의 파동전파속도는 C는 식 (1)로 표시된다.

$$C = \sqrt{\frac{T}{p}} \tag{1}$$

여기서 C : 파동전파속도 [m/s]
 T : 가선장력 [N(9.8kgf)]
 p : 가선선밀도 [kg/m]

이다.

열차속도가 파동전파속도에 가깝게 됨에 따라 그 영향이 판토틀라프 전방으로는 전파되지 않고, 후방으로 큰 파동을 치기 때문에 판토틀라프에서 트로리선이 세계 급히져 트로리선의 응력의 증대와 후속 판토틀라프의 이선 증가를 초래하므로 판토틀라프의 설계시 반영하여야 한다.

판토틀라프의 구성은 제품마다 다르지만 일반적으로 판토틀라프는 그림 1과 같이 크게 집전판, 집전판 지지부, 현가장치, 상부압, 하부압, 제어장치 등으로 구성된다. 전류가 흐르는 전차선과 직접 접촉하는 판토틀라프 집전판은 원활한 접촉이 이루어져 전원을 연속적으로 공급할 수 있게 하기 위하여 탄소, 구리 및 소결합금을 주로 이용한다. 스프링으로 구성되는 현가장치는 판토틀라프의 접촉선에 대한 추종을 좋게 하기 위하여 설치된다. 상공압과 하강압은 기구학적 운동을 결정하기 위하여 이용된다. 제어장치는 공기 모터, 스프링, 공기 벨로우즈 또는 실린더 등으로 구성되며 판토틀라프의 상하 운동을 제어하는 기능을 가진다.

2.2 틸팅차량용 판토틀라프 설계 기술

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 갠트를 주는 것과 똑같은 효과를 얻을 수 있어 적은 비용으로 열차속도를 높일 수 있다는 아이디어를 이용하여 제작된 차량이 틸팅 차량(Tilting train)이다.

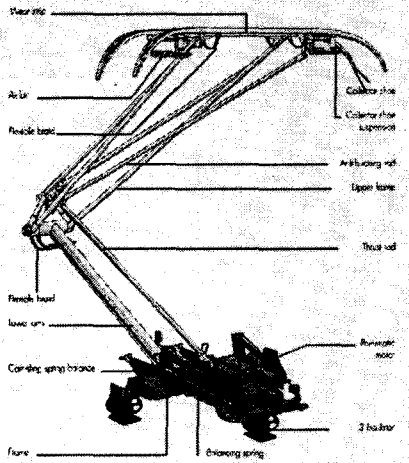


그림 1. 판토그래프의 구조

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 기울이게 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 가속도도 줄어들어 그 만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 된다. 틸팅은 곡선부에서 약 30% 정도의 속도향상을 가능하게 해준다. 일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도역전이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다. 즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정 값을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다. 위와 같은 틸팅의 원리에 따라, 틸팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 위력을 많이 발휘할 수 있다. 틸팅차량을 적용하면 기존선에서 차량의 속도를 30% 정도 향상시킬 수 있으나, 전력공급 측면에서는 차량이 기울기 때문에 안정적으로 전력을 공급할 수 없고 이선이 많이 발생할 수 있다. 가선과 판토그래프는 서로 밀접한 구조로 하나의 진동계로 구성되어야 한다.

2.3 틸팅 판토그래프 제어기술

틸팅 판토그래프의 제어알고리즘은 외국의 차량사에서 기술이전 및 공개를 하지 않는 핵심 요소기술로 본 연구에서는 그 원리와 판토그래프 제어의 핵심적인 사항을 전체적으로 기술하였다. 그림2는 판토그래프 틸팅이 이루어지는 구조를 나타낸 그림이다. 이 차량은 ICN 차량의 틸팅 구조를 나타낸 그림이다. SE는 차량의 선두와 후부에 위치하고 있으며 차량이 곡선 선로를 진입할 때 곡선을 인식하는 센서이다. 센싱 방법에는 여러 가지가 있으나 현재 가장 많이 사용하는 방법은 자이로스코프를 이용한 횡가속도 측정방법이다. 차량이 곡선 선로를 진

입할 때 횡가속도가 발생하고, 발생한 횡가속도를 필터링 처리한 후 일정 값 이상이 되면 곡선으로 인식하는 방법으로 가격이 싸고, 차량의 내부에만 센서가 있으면 된다는 장점이 있으나, 선두차가 곡선을 인식하는 시간이 필요하므로 시간지연이 필연적이다. 그러므로 선두차는 항상 시간지연을 가지고 운행을 하여 선두차의 승차감이 좀 떨어진다.

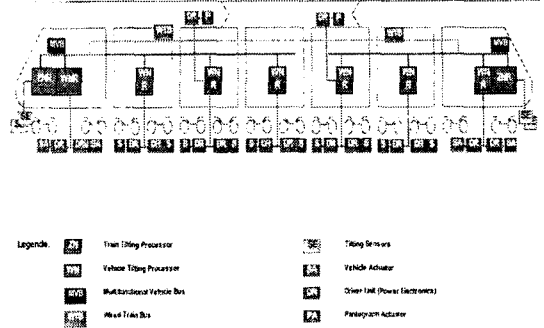


그림 2 판토그래프 틸팅 구조

또다른 방법으로는 선로의 각 곡선 위치를 표시하는 방법으로 승차감 및 정확한 틸팅제어가 가능하지만 선로 전체에 센서를 부착하고 차량에도 선로를 인식하는 센서가 필요하여 설치비용이 많고, 유지보수가 힘들다. 그리고 유럽에서는 GPS를 이용한 선로데이터 전송으로 곡선 위치를 확인한다. 이 방법은 차량의 위치를 파악하는데 1-10초 정도의 시간이 소요되며, 터널과 같은 GPS 수신이 불가능한 지역에 기지국이 설치되어야 하는 단점이 있다. 현재 국내에는 산악지역이 많아 GPS를 사용하면 터널내 기지국을 많이 설치해야하므로 비용이 상당히 증가할 것이다. 그리고 곡선 선로 위치센서를 부착하는 방법 또한 곡선선로가 많아 불리하다. 현재까지의 검토 결과로는 차량내 곡선검지 장치를 부착하여 사용하는 방법이 가장 적합하다. 그리고 판토그래프와 대차는 같은 틸팅구조로 형성되어있기 때문에 단독적으로 틸팅은 불가능한 구조 즉 상호 예러감시 기능이 추가되어야 보다 안정된 틸팅을 구현할 수 있다.

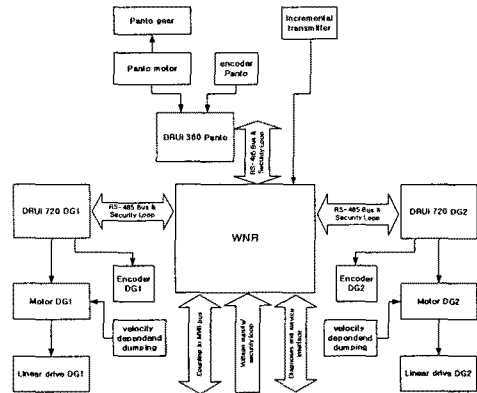


그림 3 틸팅 판토그래프 제어 구성도

그림 3은 틸팅 판토그래프 제어 구성도이며 WNR은 차량 컴퓨터로서 시리얼로 각 하부기와 통신을 하고있으며, 전기적으로 절연처리가 되어있다. DRUI는 전력장치로서 판토그래프 및 대차틸팅을 위한 전력을 공급하는 장치이다. MVB 및 WTB는 차량 통신선으로서 차량 컴퓨터에서 발생된 또는 필요한 데이터를 다른 차량 또는 편성제어컴퓨터에서 전송할수 있는 차량간 통신선

이다. WNR은 편성제어 컴퓨터로부터 곡선 데이터를 통신으로 전송받아 시리얼 통신을 이용하여 DRUi 로 보내진다. DRUi는 차량의 모터를 통해 판토그래프의 위치를 제어한다. 그리고 엔코더에서 입력받은 현재 위치를 WNR로 전송하여 현재 판토그래프의 위치를 계속 수정 할 수 있는 구조로 되어 있다.

3. 틸팅 차량용 판토그래프 개념설계

3.1 틸팅차량용 판토그래프 목표사양

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, 공력소음 등이 큰 문제로 대두되고 있다. 유럽과 일본에서는 이러한 문제를 인식하고 고속용 판토그래프에 대한 연구 개발을 활발히 진행하고 있다. 판토그래프의 핵심 설계 기술은 고주중성 설계, 기구적 설계, 구조강도 설계, 공력설계, 핵심 부품설계로 구분할 수 있다. 그리고 판토그래프 개발을 위한 차량시스템 요구조건을 분석할 필요가 있다. 판토그래프의 주요 요구조건은 다음과 같다.

- 운행속도
 - 최고운행속도 : 180 km/h
 - 설계속도 : 200 km/h
 - 열차는 설계속도 200 km/h로 주행 시 또는 200 km/h에서 정지시 안전하여야 한다.
- 판토그래프 요구조건
 - 판토그래프는 1 유닛(3량)당 1개씩 설치하며, 출발에서 설계속도 200 km/h까지의 모든 속도에서 추진 및 보조동력에 필요한 전류를 집전할 수 있는 성능을 가져야 한다.
 - 판토그래프는 모든 운행속도에서 주행시간의 5% 이상의 이선이 발생하지 않아야 한다.
 - 판토그래프는 곡선 통과시 대차의 틸팅 메카니즘과 연동으로 작동하여 주행성능을 향상하여야 한다.

3.1 집전성능평가 결과

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 결과를 아래표 2에 나타내었다. 표1은 시뮬레이션을 위한 판토그래프 데이터 값이다.

표 1. 판토그래프 특성 데이터

	등가질량 (kg)	스프링상수 (N/m)	감쇠상수 (Ns/m)	압상력 (N)	공력압상계수 (N/(Km/h) ²)
팬 헤드부	7.0	9,000	0.0	-	-
중간지지부	8.1	1,200	0.0	-	0.00125
메인프레임부	23.0	0.0	140	60	-

기준선 가선계의 곡선당김금구의 압상량은 100mm로 제한되어 있기 때문에 그 부분에서의 압상량 여유율을 2정도로 보았을 때 약 50mm의 압상량을 초과하지 않으면 문제가 없을 것으로 판단된다. 경간 길이 40m일 경우, 판토 1호만 평균 접촉력 대 표준편차의 비가 20% 이내이고 판토 2호 및 3호는 초과함을 알 수 있다. 곡선당김금구의 압상량은 판토그래프 1호, 2호 및 3호 모두에서 50 mm를 초과하므로 양호한 집전이 가능하지 않을 것으로 판단된다.

경간 길이 50.0 m일 경우, 판토 1호, 2호 및 3호 모두 평균 접촉력 대 표준편차의 비가 거의 20.0% 이내임을 알 수 있다. 곡선당김금구의 압상량은 판토그래프 1호, 2호 및 3호 모두 50 mm이내에 있으므로 양호한

집전이 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 경간길이 변화에 대한 집전성능(V=200 km/h)

Length of Span (m)	판토 그래프	Fmean (N)	S.D. (N)	S.D./Fmean (%)	Uplift of Bracket (mm)
40	판토1	114	19	17	33
	판토2	116	29	25	33미만
	판토3	117	34	29	33미만
50	판토1	117	25	21	39
	판토2	114	20	18	39미만
	판토3	116	23	20	39미만
60	판토1	118	29	25	58
	판토2	126	48	38	58미만
	판토3	126	48	38	58미만

경간 길이 60.0 m일 경우, 판토 1호, 2호 및 3호는 평균 접촉력 대 표준편차의 비 20.0%를 초과한다. 그리고 곡선당김금구의 압상량은 판토그래프 1호, 2호 및 3호 모두에서 50 mm를 초과하므로 양호한 집전이 가능하지 않을 것으로 판단된다.

따라서 설계속도 200 km/h까지 주행하는데 집전 성능이 가장 양호할 것으로 예측되는 경간길이는 50 m로 판단되며, 위에서 제시한 전차선 및 조가선의 사양이 적절할 것이라고 판단된다.

4. 결 론

가선/판토그래프 동특성 시뮬레이션 통하여, 표준 경간 50 m의 기준선 가선계의 기본 사양과 판토그래프의 설계변수 변화를 토대로 집전성능의 영향을 해석한 결과, 기준사양과 비교분석한 결과 집전성능이 우수함을 알 수 있다. 따라서, 기준선 고속 틸팅열차용 판토그래프의 등가모델에 대한 기본사양은 시뮬레이션에서 이용된 판토그래프의 기준사양으로 선정하는 판단기준으로 사용가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최진민 외, 고속전철 집전시스템의 개념 설계(Ⅱ), 한국기계연구원 연구보고서, 1996.
- [2] Schneider, R., Pantographs for Tilting Trains, Colloguium digest, IEE, Issue 509, 1998
- [3] 전남선 전철화 타당성 조사 및 기본 계획, 한국철도기술연구원, 2001
- [4] 기준선 고속 틸팅 열차 차량 시스템 요구사항, 한국철도기술연구원, WBS No : 2100-D001 Rev.A