

도시철도 simple catenary가선구조에서의 집전성능 향상방안에 관한 연구

Study on the Current Collection Characteristics and Improvement Methods of Simple Catenary Systems

박용철* Chang, sang-Hoon 송중호***

Park, yong cheol Chang, sang-Hoon Song, Joong Ho

Abstract

The decisive criteria to determine collection performance is the contact force between pantograph and catenary. The contact force consists of a static force and dynamic force related to vibration characteristics, train speed and etc. The low contact force leads to the loss of contact, and most countries regulate it below 3~5% at operation speed. This study presents a technical overview of criteria for collection performance and modelling and simulation methods to analyze dynamic characteristics of catenary.

1. 서론

전기철도 시스템에서 전차선로 가선은 전기차량에 전력을 공급하는 설비이며 전기철도의 속도를 결정해 주는 중요한 설비중의 하나이다. 전차선은 팬터그래프가 일정한 압상력으로 주행함으로써 진동에 의한 파동이 발생하며 이 파동에 의해 전차선과 팬터그래프 사이에는 이선이 발생하는데 이에 따라 전력 공급 장애, 아크의 발생, 전차선 및 습동판의 이상마모, 전차와 발생 등의 원인이 된다. 또한 환경변화(온도, 바람, 진류변화)와 외력(시공, 보수작업중의 손상, 금구의 취부)에 따라 미소한 변화가 발생하며 이러한 것들이 전차선 가선구조의 성능에 결정적인 영향을 주게 된다.

이러한 현상을 감안하여 설계시 가능한 한 균일한 단성을 갖도록 설계되어야 하며 팬터그래프와의 인터페이스에서 원활한 접촉력을 유지하기 위해 정·동역학적 해석과 이를 토대로 한 설계가 요구된다. 최근 수도권에서는 통행인구 및 차량의 증가로 자동차의 평균속도가 떨어지게 되어 주요 교통수단의 일환으로 전기철도가 주목을 받고 있으며, 현재 수도권 서울시의 도시철도 수송 분담율은 35.3%에 이른다.

도시철도 시설중 전동차에 직접전력을 공급하는 전차선로의 설비는 크게 강재와 카테너리 전차선 가선방식으로 분류되며, 이중 카테너리 전차선은 전동차 팬터그래프와의 추종성이 좋아 열차의 속도향상에 유리한 반면, 항상 적정하고 균일한 장력을 유지하여야 하는 부담을 갖고 있다.

실제로 전차선 장력의 불균형 또는 불량이 의거한 전차선 단선이나, 전동차 팬터그래프의 손상 등이 발생하여 열차운행을 지해한 장애 등이 종종 일어나고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 카테너리 전차선의 장력 불량이 열차운행 및 시설물에 미치는 영향을 조사하고, 문제발생에 대한 해결방법을 검토하며, 또한 카테너리 전차선에 있어서의 최적의 장력을 연구하여 제시함으로써 열차의 안전운행 도모 및 향후 도시철도 운전속도의 증속에 대비하고자 한다.

* 서울특별시도시철도공사, 팀장, 정회원

** 한국철도기술연구원, 책임연구원, 정회원

*** 서울산업대학교, 교수, 정회원

2. 집전성능 향상을 위한 이론적 검토

도시철도 전동차는 이동하면서 외부에서 전력의 공급을 받는 것으로 집속에 의한 집전 방법을 사용하고 있다. 여기서는 가선·팬터그래프 집전성능의 문제점에 대하여 검토한다.

가. 속도와 이선

속도가 높아지면 이선율이 증가한다. 특히 어느 속도에 도달하면 이선이 급격히 증가하는 경향이 있다. 전류가 끊어지는 큰 이선이 발생하면 가선·팬터그래프의 이상마모와 파손을 일으키게 된다. 이선율은 집전소음 등을 고려하여 직류의 경우 3~5%정도가 유지되어야 하며, 단일 팬터그래프를 사용하는 경우 부고속철도의 경우 이선율을 1%이하로 적용하고 있다.

팬터그래프는 스프링과 걸림에 의한 주파수 특성을 갖게되어 속도가 높으면 가선의 고저차와 진동에 의해 변위에 대한 추종성이 나빠져 접촉력의 변동이 크게되어 접촉이 안되게 되는데 이것을 이선이라 하며 특히 열차의 속도가 고속영역에 있으면 가선의 파동진파속도 부근에 이르러 큰 이선이 발생한다. 가선의 파동진파속도 C 는 다음 식과 같다.

$$C = \sqrt{T/\rho}$$

여기서, C : 파동진파속도[m/s], T : 전차선 장력[N], ρ : 가선선밀도[kg/m]

열차속도가 파동진파속도에 가까워지면 팬터그래프 전방에는 전과의 영향이 있고, 후방에는 큰 파장을 일으켜 팬터그래프 앞에서 전차선이 심하게 굴곡되어 전차선 응력의 증대 및 다른 팬터그래프 이선의 증가를 초래하며 일반적으로 파동진파속도의 70% 정도의 속도가 실용한계로 적용되고 있다.

열차속도를 향상하기 위해서는 가선의 파동진파속도를 증가시킬 필요가 있는데 가선 장력을 높이는 것은 한계가 있기 때문에 가선 선밀도를 낮추는 것이 좋는데 이를 위해 외국(일본, 프랑스, 독일)에서는 경량가선의 하나로 철·알루미늄 전차선의 개발이 진행되고 있다.

나. 속도와 압상량

고속에서는 팬터그래프에 공기역학적으로 양력(揚力)이 생겨 팬터그래프가 가선을 압상하는 양이 커지게 된다. 특히 장력이 작은 가선에서는 이 현상이 현저하게 나타나며 압상한도를 초과하면 팬터그래프가 가선의 교차개소에 잘못 접촉되거나 가선 굽구에 충격을 주게 된다. 따라서 압상량의 한도를 80~100mm로 기준을 정하여 운용한다. 팬터그래프 제작시 이러한 공기역학적 양력을 고려하여야 한다.

다. 팬터그래프 수와 속도

다수의 팬터그래프는 동력분산 방식을 적용하고 있는 차량에 사용되는 것으로 가선의 보수에 대해서는 마모 및 진동 등에 의해 분리한 특성을 가지고 있다. 팬터그래프 간격이 크면 진동의 영향이 작아지며 진동의 감쇄가 커지면 이선이 작아진다.

도시철도처럼 다수 팬터그래프가 주행할 때에 후부 팬터그래프에서 가선과 팬터그래프의 진동이 증가하는 현상이 있다. 이 결과 아크를 동반하는 큰 이선이 발생하고 집전계통의 소음증가와 전차선의 굽부마모를 발생시킨다는 문제가 발생하고 있다.

이처럼 다수 팬터그래프의 공진은 공간길이 정도이상의 임의의 팬터그래프 간격에서 생기고 조건에 따라서는 고속에서도 일어난다. 고속에서 생길수록 이선이 커지는 것이 시뮬레이션 결과에 의해서 예측되고 있으며 그 집전성능의 방해정도는 커진다. 그래서, 그 대책의 방침으로서는,

(a) 고속정상 주행속도에서 공진이 생기지 않도록 팬터그래프를 배치한다.

(b) 팬터그래프와 가선에 댐퍼를 취부하는 것이 효과적이다.

라. 가선의 장력

장력은 전차선의 파동전파속도에 관계되고 가선·펜터그래프 계통의 중요한 관리항목이며, 집전성능의 향상은 장력에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 여기에서는 요크와 장력, 파동전파속도의 관계에 대해서 검토한다.

심플 커티너리는 전차선·조가선의 2선을 텐션 밸런서로 장력을 조정할 때, 1개의 3각 요크를 사용한다. 3각 요크의 경우, 그 형상에서 요크가 기울어지면 장력이 변화함을 초래한다. 따라서, 요크가 수직으로 서서 장력이 설정값 대로 되어 있는 것이 집전성능을 충분히 발휘하는 조건이다. 3각 요크의 기울기와 전차선 장력, 파동전파속도의 관계를 구해보면 다음과 같다.

아래 그림에서 전차선과 조가선을 인유하고 있는 3각 요크의 계산 모델을 나타낸다. 요크가 그림과 같이 기울어져도 전체의 장력 T가 변화하지 않으면 전차선의 장력은 다음 식과 같이 된다.

$$T_{12} = (T/2)(1 - \tan \theta_2 \cdot \tan \Delta\theta) \quad (1)$$

$$\approx (T/2)(1 - \tan \theta_2 \cdot \Delta\theta) \quad (2)$$

(단, $\Delta\theta$ 가 16°정도까지는 위 식에서도 충분한 정밀도가 있다)

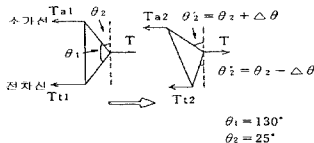


그림 1. 요크의 기울기 모델(전차선, 조가선)

위 식(1)에서 계산한 결과를 보면 요크가 그림1에 나타난 방향으로 12°기울어진 경우, 전차선 장력은 약 1.46kN, 파동전파속도는 약 18km/h 저하함을 알 수 있다.

18km/h의 저하는 값이 작은듯하지만 조가선을 인유하고 있는 요크가 기울어지고 T가 작아지면 이 값은 더욱 작아진다. 실제로 조가선과 전차선의 재료는 다르기 때문에, 온도변화에 따라라도 요크는 기울어지고 장력 T는 변화한다. 이 때문에 3각 요크의 기울기를 보통, 수직으로 유지하는 것이 집전성능을 유지하는 포인트라 할 수 있다. 따라서 장력장치는 움직일 수 있는 상태에서 펜터그래프의 통과에 저항이 없는 전차선 권위의 확보, 자동장력조정장치 유무에 따른 장력변화의 조정 여부, 펜터그래프 습동에 의한 마모에 따른 단면적의 감소 등을 고려하여 결정해야 한다.

3. 집전성능 예측

가. 조가선 장력조정에 의한 집전성능 예측

도시철도에서 전차선로는 움직이는 열차에 전력을 공급하기 위한 설비로서 차량에 설치된 펜터그래프가 전차선로와의 기계적 접촉을 통하여 집전하게 된다. 그런데 펜터그래프는 전차선과의 접촉을 유지하기 위하여 전차선로에 상부로 미는 힘(압상력)을 주면서 동시에 빠른 속도로 앞으로 이동함으로써 전차선과 펜터그래프 사이에는 동역학적인 상호작용이 발생하며, 이러한 동역학 작용이 집전성능을 좌우하게 되고, 열차의 한계속도를 결정하는 주요 요소가 된다. 이러한 동역학적 상호작용은 실제 현장 시험이나 실험을 통하여 확인하는 것이 가장 확실한 방법이나, 근래에는 시뮬레이션 기술을 활용하여 컴퓨터 상에서 모의 실험함으로써 동역학적 특성을 파악해 보는 것이 가능하며, 프랑스, 독일, 일본 등 원도선 전역에서 다년간 시뮬레이션과 실제 측정 데이터와의 접촉을 통하여 시뮬레이션의 정확성이 어느 정도

확보되어 있는 상태이다. 따라서 동역학 시뮬레이션은 전자선로 시스템을 설계하기 이전 또는 설계된 시스템의 성능확인을 위하여 실시하게 된다.

여기서는 조가선 장력조정에 따른 집전성능 확인을 위해 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 “가선도(架線道)” 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

시뮬레이션 조건은 그림 2와 표 1과 같다.

(1) 시뮬레이션 조건

정상운전조건에서의 집전성능의 판단을 위하여 다음과 같은 조건을 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다.

- (a) 설계 최대속도에서의 집전성능 평가를 위하여 열차속도 120km/h에서 일반 팬터그래프를 이용하여 시뮬레이션
- (b) 출력데이터의 취득
 - 5경간중 가운데 1경간을 유효데이터로 처리
 - 그래프 취득 : 전자선 구성화면, 접촉력
 - 데이터 : 평균접촉력, 최대접촉력, 접촉력 표준편차, 최대압상량

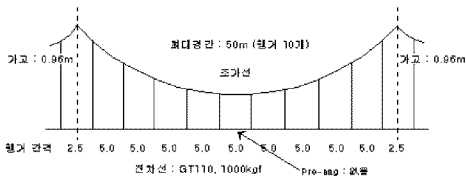


그림 2. 시뮬레이션에 적용된 심플커터너리 구성도

표 1. 시뮬레이션 조건

가선 조건	조건	조가선종	조가선 장력	전차선 종류	전차선 장력
	조건1	st90mm ²	9.8kN	GT110mm ²	9.8kN
	조건2	st90mm ²	14.7kN	GT110mm ²	9.8kN
	조건3	st135mm ²	19.6kN	GT110mm ²	9.8kN
	조건4	st135mm ²	24.5kN	GT110mm ²	9.8kN
경간 : 50m, 가선구배 : 없음, 행거 간격 : 5m					
주행조건 : 속도 120km/h					

(2) 시뮬레이션 결과

집전성능을 분석하기 위해 조건별 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

동역학 시뮬레이션 데이터에서 집전성능을 평가하는 기준으로 일반적으로 접촉력을 기준으로 삼는다. 접촉력의 크기는 이선율과 관련이 있고 또 전자선 및 집전판의 기계적 마모와 이선으로 인한 아크 마모 등과 직접적인 관련이 있기 때문이다. 집전성능에 대한 평가기준은 철도 선진국에서도 각 나라마다 다르다. 그러나 독일, 프랑스, 일본 등에서 거의 유사한 하나의 기준은 평균접촉력에 대한 표준편차의 비가 대략 20% 정도 이내일 때를 양호한 집전상태로 평가한다.

양호한 집전상태 : 표준편차(σ)/평균집속력(F_m) \leq 20%

표 2의 시뮬레이션 결과는 조가선 장력이 24.5kN 이외에는 기준을 만족한다. 결국 이 시뮬레이션에서 조가선 장력을 너무 높여도 팬터그래프에 대한 추종 성능이 떨어져 집전성능이 나빠지는 경향을 알 수 있다.

표 2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건 (조가선 장력)	평균 집속력	집속력 표준편차	최대 집속력	최소 집속력	표준편차/ 평균집속력	결과
9.8kN	57.98N	10.18	83N	39N	17.5%	양호
14.7kN	57.5N	10.77	82N	41N	18.7%	양호
19.6kN	57.2N	11.65	83N	41N	20%	양호
24.5kN	57.1	11.53	79N	37N	20.1%	불량

나. 전차선 장력조정에 의한 집전성능 예측

시뮬레이션 조건은 정상운전조건에서의 집전성능의 판단을 위하여 조가선과 같은 조건으로 다음과 같이 전차선 장력을 변화키면서 시뮬레이션을 실시하였으며, 평가기준도 동일하다.

표 3. 시뮬레이션 조건

가선 조건	조건	조가선종	조가선 장력	전차선 종류	전차선 장력
	조건1	st135mm ²	14.7kN	GT170mm ²	14.7kN
	조건2	st135mm ²	14.7kN	GT170mm ²	15.7kN
	조건3	st135mm ²	14.7kN	GT170mm ²	16.7kN
	경간 : 50m, 가선구배 : 없음, 행거 간격 : 5m				
주행조건 : 속도 120km/h					

표 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건 (전차선 장력)	평균 집속력	집속력 표준편차	압상량 (mm)	표준편차/ 평균집속력	결과
14.7kN	52.7N	7.43	13.9	14.1%	양호
15.7kN	51.2N	6.86	12.2	13.4%	양호
16.7kN	50.8N	6.50	10.7	12.8%	양호

4. 결론

본 연구에서는 도시철도 심플 커터너리 방식의 집전성능 향상을 위해 각 설계요소에 대한 기술 검토를 실시하였으며, 조가선과 전차선의 장력변화가 집전성능에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 시뮬레이션을 실시하여 그 결과를 제시하였다.

- 집전성능에 대한 평가기준은 표준편차(σ)/평균값속력(F_m) \leq 20%을 적용하였다.
- 가선/팬더그래프 시뮬레이션 결과 조가선 장력을 너무 높여도 팬더그래프에 대한 추종 성능이 떨어져 집전성능이 나빠지는 경향이 있다.
- 그러나 전차선의 경우는 장력을 높일수록 집전성능이 양호한 것으로 분석되었다.

현재 서울시의 도시철도 수송 분담율은 35.3%에 이르고 있으며, 앞으로 더욱 수송 분담율이 증가할 것으로 예상되는 바 승객의 안전과 서비스 향상을 위해서는 전차선 관련 사고를 줄이는 동시에 속도의 증속도 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 시도한 커티너리 설계요소 기술에 대한 검토 및 장력변화에 따른 집전성능의 예측은 앞으로의 도시철도 가선시스템의 설계 방향을 제시하는데 의의가 있다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, “전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구(III)(고속철도 전차선로 설계요소기술 분석 및 성능시험기술), 한국고속철도건설공단, 1998. 12.
2. 장상훈, 이기원 외, “고속화에 대응한 가선구조의 특성 최적화 방안 연구” 한국철도기술연구원, 2000.12
3. UIC 606-1 OR “Consequence of the application of the kinematic gauges defined by UIC leaflets in the 505 series of the design of the contact lines(1)”, 1st Edition, 1987, 1, 1
4. UIC 505-4 ORI “Effects of the application of the kinematic gauges defined in the 505 series of leaflets on the positioning of structures in relation to the tracks and of the tracks in relation to each other”, 3rd Edition, 1977, 1, 1
5. 鐵道總合技術研究所 編, “電車線とパンタグラフの特性”, 財團法人 研友社, 1993, 10,
6. 社團法人 鐵道電化協會, “日本 國有鐵道 電氣局 制定 電氣工作物 <電車線路> 設計施工標準”, 1979