

고속화에 대응한 전차선로 설계 요소기술

창상훈
한국철도기술연구원

김양수
한국철도대학

박병수
은세기술(주)

Design Essential Element Technology of Catenary System be in Correspondence with Speed-up

Sang-Hoon Chang, Yang-Soo Kim, Byung-Soo Park

Korea Railroad Research Institute, Korea National Railroad College, Eun-se Engineering. Co.

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 1% at operation speed. This study presents a technical overview of criteria for collection performance of catenary system.

1. 서 론

전기철도 시스템에서 전차선로 가선은 전기차량에 전력을 공급하는 설비이며 전기철도의 속도를 결정해 주는 중요한 설비중의 하나이다.

전차선은 팬티그래프가 일정한 압상력으로 주행함으로써 진동에 의한 파동이 발생하며 이 파동에 의해 전차선과 팬티그래프 사이에는 이선이 발생하는데 이에 따라 전력공급 장애, 아크의 발생, 전차선 및 슬립판의 이상 마모, 전자파 발생 등의 원인이 된다. 또한 환경변화(온도, 마모, 전류변화)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 탄성을 갖도록 설계되어야 하며 팬티그래프와의 인터페이스에서 원활한 접촉력을 유지하기 위해 정·동역학적 해석과 이를 토대로 한 설계가 요구된다.

집전성능을 판단하는 가장 결정적인 기준은 팬티그래프와 전차선간의 접촉력이다. 접촉력은 임의로 주어지는 정적 접촉력과 전차선과 팬티그래프 사이의 진동특성 및 차량속도와 관련한 동적 접촉력으로 구성된다. 접촉력이 너무 작으면 이선이 일어날 가능성이 많은데 대부분의 국가에서는 보통 운영속도에서 팬티그래프와 전차선 사이의 이선율을 1% 이하로 규정하고 있다. 본 논문에서는 고속화에 따른 집전성능 향상을 위한 요소기술 및 집전성능 평가기법에 대하여 다루었다.

2. 가선의 집전특성 분석

2.1 전차선의 파동전파 속도 특성

2.1.1 진동수와 파동전파속도

전차선에 전달하는 파에는 종파(縱波)와 횡파(橫波)가 있으며, 통상 문제가 되는 것은 횡파이다. 장력이 걸려 있기 때문에 전차선은 일반적으로 현(弦)으로 간

주하는데 주파수가 높아지면 빔의 영향이 나타나게 된다.

(1) 현(string)의 경우

전파하는 횡파의 속도 C 는 전차선의 장력, 선밀도를 각각 T , ρ 라고 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (2.1)$$

(2) 빔의 경우

전파하는 횡파의 속도 C_{EI} 는 전차선의 만곡강성, 선밀도를 각각 EI , ρ , 진동수를 f 라고 하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{EI} = \sqrt{2\pi f} \left(\frac{EI}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.2)$$

2.1.2 파동전파속도와 집전성능

파동전파속도가 집전성능에 미치는 영향에 대해서 검토해 보면 다음과 같은 특징이 있다. 무차원화 속도 β 는 팬티그래프의 주행속도와 전차선의 파동전파속도의 비로 나타낼 수 있다. 이선율과 β 의 상관관계는 매우 높으며, 전차선의 압상량의 변형도 이선율과 마찬가지로 β 와 상관관계가 높다.

현재 일반 문헌 등에서는 β 를 약 0.7 이하로 하는 것을 권장하고 있다. 따라서 고속화를 하기 위해서는 전차선의 파동전파속도를 높게 할 필요가 있다. 파동전파속도 C 는 전차선의 장력과 선밀도에 의해 결정되며, 파동전파속도를 높게 하기 위해서는 장력을 높게 하거나 선밀도를 작게 해야 한다.

그리고 가설 후 시간의 경과에 따라 요크가 기울어지고 장력이 변화하는 경우가 있는데 장력이 변화하면 파동전파속도도 변하기 때문에 집전계통의 성능을 설계한 대로 유지하기 위해서는 장력관리가 중요하다.

2.1.3 파동전파속도를 초과하여 주행할 때의 현상

장력이 걸린 빔을 힘이 주행한다고 가정하여 모델로서 계산했을 때 β 가 작을 때는 착력점(着力点)의 압상량이 최대이고, β 가 1에 근접함에 따라 그 값도 커진다. 그리고 β 가 1이 되면 압상량은 정적 압상량의 약 2.4배가 된다. 그와 동시에 착력점 전방에서 전차선이 급격히 굽어지게 되며, 힘이 파동전파속도 C

를 초과하고 β 가 1 이상이 되면 착륙점 후방의 변위도 커지고 전방에는 만곡강성에 의한 파동이 전파된다. 즉, 전차선의 과도한 압상량은 가선금구의 접촉과 파괴를 동반하고, 전차선의 급격한 절곡(꺾임)은 전차선의 소성 변형과 단선을 유발할 가능성이 있다. 1회의 주행은 가능해도 팬터그래프가 여러 번 주행한 후에는 가선이 파괴상태가 될 가능성이 높아지게 되므로 주의가 필요하다.

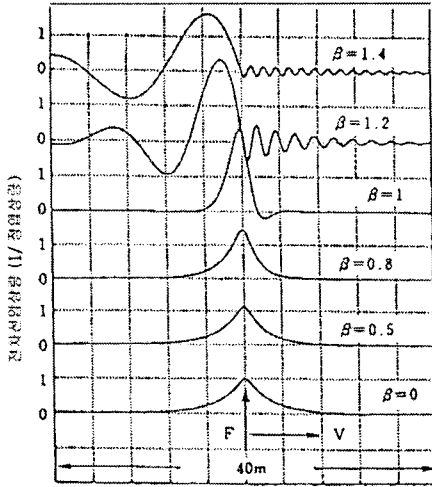


그림 1. 무차원화 속도특성에 따른 빔의 변형

2.2 가선과 팬터그래프의 공진현상

2.2.1 다수 팬터그래프에 의한 공진

수도권 전동차와 같이 다수 팬터그래프가 주행할 때 후부 팬터그래프에 의해 가선과 팬터그래프의 진동이 증가하는 현상이 있다. 이 결과로 인하여 아-크를 동반하는 큰 이선이 발생하고 집전계통의 소음증가와 전차선의 국부마모를 발생시키는 문제로 이어진다.

이처럼 다수 팬터그래프의 공진은 경간길이 이상의 임의의 팬터그래프 간격에서 생기고 조건에 따라서는 고속에서도 일어난다.

고속에서 공진이 발생하게 되면 이선이 커지며 양호한 집전성능을 보장하기 어렵다. 그 대책 방안으로는

- (i) 고속 정상주행속도에서 공진이 생기지 않도록 팬터그래프를 배치한다.
- (ii) 팬터그래프와 가선에 댐퍼를 취부하는 것 등이 있다.

2.2.2 단 팬터그래프에 의한 공진

팬터그래프가 1개인 경우에도 팬터그래프의 진동이 커지는 경우가 있으며, 이 경우에서도 대이선이 발생한다. 특히 짧은 경간의 가선구조에서 발생할 가능성이 크며, 전류용량이 큰 직류 전철화구간에서는 팬터그래프의 용단과 집전판 마모의 요인이 될 수 있으므로 주의가 필요하다.

이러한 공진현상의 발생을 억제하여 집전성능을 향상시키는 방법으로는 계통의 감쇠정수를 크게 하는 것이 효과적이다.

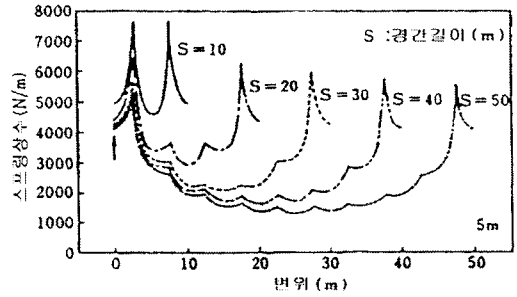


그림 2. 각 경간 길이별 스프링 상수(심부 커터너리)

2.3 고속집전의 조건분석

기존에 철도의 물리적 속도한계는 300[km/h]를 초과하는 정도라고 말해 왔다. 그것은 차륜과 레일의 접촉력과 주행저항이 균형을 이루어 그 이상의 가속은 불가능하다는 것이 일반적인 정설이었다. 이 때문에 일부 철도선진국에서는 실용속도를 250[km/h] 정도로 상정하여 건설이 추진되어 왔던 것이 사실이다.

그러나 TGV와 ICE에서 400-500[km/h]를 넘는 스피드 기록이 달성되어 고속화에 대한 관심이 고조되고 있으며, 우리나라도 2004년 4월 고속철도가 개통되어 운행중에 있다. 여기서는 집전계통의 속도향상에 대한 대응을 중심으로 검토하고자 한다.

2.3.1 속도향상에 관한 집전계통의 조건

속도향상을 할 때의 집전계통의 문제점으로는 이선의 증가, 가선진동(압상량)의 증가, 가선구성 부속재료의 응력(변형)의 증대 및 집전계 소음의 증가 등이 있으며, 이러한 요인들을 기준값 이내로 억제하는 것이 속도향상의 필요조건이 되고 있다.

(1) 이선

이선은 본래 팬터그래프와 전차선이 기계적으로 떨어진 상태에서 정의되고 있는데, 아-크로 전기적으로 연결되고 있는 경우와 팬터그래프간을 고압모션으로 연결한 상태에서의 이선은 어떻게 생각해야 하는지 등, 그 평가방법과 집전상의 장애현상이 현재 명확해졌다고는 할 수 없다.

일반적으로 기존선에서는 이선용의 허용값으로서 팬터그래프 집전판의 마모량과 그 교환 주기의 관계에서 3-5%를 목표값으로 하고 있다.

최근 수송서비스의 향상을 위해 1열차 1팬터그래프의 편성 전기차가 세계적인 추세이다. 이 전기차는 power electronics의 기술 진보에 의해 인버터를 탑재한 것이 많으며, 이 제어방식 차량은 이선용보다도 1회 이선시간이 크면 동작불능상태가 되기 때문에 1회 이선시간의 규제가 필요하게 된다.

기존의 직류전전동기인 MG타입 차량에서는 1회 최대 이선시간이 200[ms] 정도라도 특별히 문제는 없었지만 주 회로와 보조 전원장치로 인버터를 사용하고 있는 차량에서는 10-20[ms] 이하로 해야 전장품의 정상적인 동작을 보장할 수 있다.

(2) 전차선 압상량

전차선로와 팬터그래프의 접촉관계를 전차선의 압상량을 변화시켜서 그림을 그려보면 팬터그래프가 가선금구에 충돌하지 않는 압상량의 최대값은 기존선 타입에서 150[mm]가 된다. 즉, 지지점의 압상량은 최대

150[m] 허용되게 되는데 안전을 고려하여 100[m]의 압상량이 되면 곡선당김금구의 stopper가 동작하여 그 이상 압상되지 않는 구조로 되어 있다. 스톱퍼가 동작하면 이른바 경점이 되기 때문에 강풍 등 이상시에만 동작시키고, 팬터그래프 주행에서는 스톱퍼 동작이 없는 상태로 유지되어야 한다.

또한, 전차선이 마모되어 중량이 가벼워지거나 (직경 15.49m의 전차선이 10[m]가 되면 21[m] 떠오른다) 장력장치의 고장 등에 의한 지지점의 상승에 대한 보수여유로서 30[m]를 고려하면 팬터그래프만에 의한 압상량은 최대 70[m]가 된다.

(3) 전차선 응력 (변형)

기존에 전차선은 마모에 의한 교환주기는 피로에 대한 사용한도보다 짧다고 생각되었지만, 일부 구간에서 가선의 교차 금구개소 등에서 교체 후 얼마 지나지 않아 전차선이 피로파단을 일으키는 사고가 발생함으로써 응력의 반복에 의한 피로가 문제되는 경우도 있다.

속도향상에 따라 전차선의 발생응력도 증대하기 때문에 특히, 전차선에 취부되어 있는 금구류 주위에는 응력이 집중하므로 주의가 필요하다.

장력이 걸린 동 전차선의 허용 응력값으로서는 60[Mpa] (변형 환산 500×10^{-6})이 제안되고 있는데, 속도향상에 의해 이 기준값을 초과하는 개소도 있기 때문에 누적(累積) 팬터그래프수를 규제하는 등의 방법에 의해 피로에 대한 관리를 실시할 필요가 있다.

(4) 피로 전송속도

속도향상에 따른 이선의 증가, 전차선 압상량의 증가 및 전차선 변형의 증가는 어느 것이나 파동전파속도에 가깝기 때문에 생기는 현상이라고 생각할 수 있다. 이 때문에 전차선의 파동전파속도를 향상시키면 필연적으로 이 규정값들이 기준값을 만족하는 결과가 된다. 파동전파속도에 대한 열차속도의 비가 집전특성의 지표 가운데 하나로서 평가되고 있는 경우도 있다. 일반적으로는 열차의 최고속도는 파동전파속도의 70[%]정도 이하로 한다.

3. 집전성능 평가

설계된 전차선로에 적합한 팬터그래프를 통하여 안전성 있고 신뢰성 있는 에너지를 열차에 전달하여 주는 것이 전차선로/팬터그래프 시스템의 기능이다.

집전성능을 판단하는 가장 결정적인 기준은 팬터그래프와 전차선간의 접촉력이다. 접촉력은 임의로 주어지는 정적 접촉력과 전차선과 팬터그래프 사이의 진동특성 및 차량속도와 관련한 동적접촉력으로 구성된다. 접촉력이 너무 작으면 이선이 일어날 가능성이 많고, 대부분의 국가에서는 보통 운영속도에서 팬터그래프와 전차선 사이의 이선율을 1[%] 이하로 규정하고 있다.

아크(arc)는 전차선 및 집전판에 마모를 유발하기 때문에 전차선 및 집전판 수명을 짧아지게 한다. 접촉력이 너무 크면 전차선 마모가 커지게 되고 최악의 경우 비정상적인 전차선 압상으로 인하여 곡선당김금구의 압상 제한치를 초과하게 되어 사고를 유발한다. 이러한 경우가 전차선로 및 팬터그래프에 주된 손상의 원인이다. 또한, 이러한 비정상적인 압상 및 진동은 전차선로 부재에 피로문제를 야기 시킨다. 전차선로 건설은 많은 투자가 필요하므로 이러한 수명단축

을 시키는 문제를 배제하여 설계하여야 하며, 비정상적인 마모를 작게하고 집전성능을 향상시키기 위하여 팬터그래프와 전차선로 사이의 최적 인터페이스가 필요하다. 그러므로 전차선로 설계의 최대 목적은 접촉력 변동을 최대한 작게하여 어떠한 변화없이 신뢰성 있는 집전성능을 유지하는 것이다.

최근 유럽철도에서는 집전성능의 판단기준으로 이선보다는 접촉력에 대한 통계분석이 사용되고 있다. 접촉력 통계는 측정치 또는 계산치로부터 쉽게 구할 수 있고, 다음과 같은 파라미터가 주로 사용된다.

- 평균접촉력(F_m), 접촉력 범위 ($F \pm 3\sigma$), 통계적 이선, 이선이 일어날 수 있는 통계적 접촉력(예 : 40N),가동브라켓트의 최대 압상량

그리고, 유럽 각국의 집전성능 판단기준은 평균접촉력 및 표준편차를 병합해서 정하거나 이선으로 정하기도 한다.

그리고, 주어진 팬터그래프/전차선로 시스템의 성능을 판단할 때 다음과 같은 주요 파라미터가 시스템의 성능을 좌우한다.

- 전차선로 장력
- 전차선 사전이도
- 집전높이 설치 오차
- 정적/동적 압상량

또한, 위와 같은 파라미터에 덧붙여서 팬터그래프의 압상력을 최적화하는 데에 공력을 반드시 고려해야 한다.

다음 표는 ERRI 보고서 ("ERRI A186/RP1", 1996년 4월)에 따른 집전성능 판단기준이다.

[표] 각국의 집전성능 판단기준

| | 평균 접촉력 | 이 선 |
|------------|--|--|
| 프랑스 (SNCF) | - | 100m당 1아크이하 |
| 독일 (DB) | 평균접촉력 $\leq 120N$ 표준편차 $< 24N$ 평균접촉력 $-3 \times$ 표준편차 > 50 표준편차 $\leq 0.2 \times$ 평균접촉력 | $3 \times$ 평균접촉력 \times 표준편차 ≥ 0 |
| 영국 (BR) | $3 \times$ 평균접촉력 \times 표준편차 ≥ 0 | 0.2%이하 |

4. 결 론

본 연구에서는 전차선 동특성 해석과 관련하여 집전성능평가 기준에 대한 기술검토와 속도향상에 따른 가선 시스템의 집전성능에 대해 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 파동전파속도와 집전성능

고속화를 하기 위해서는 전차선의 파동전파속도를 높게 할 필요가 있으며, 파동전파속도 C 는 전차선의 장력과 선밀도에 의해 결정되므로 파동전파속도를 높게 하기 위해서는 장력을 높게 하거나 또는 선밀도를 작게 해야 한다.

그리고 가설 후 시간의 경과에 따라 요크가 기울어지고 장력이 변화하는 경우가 있는데 장력이 변화하면 파동전파속도도 변화하기 때문에 집전계통의 성능을 설계한 대로 유지하기 위해서는 장력관리가 중요하다.

(2) 다수 팬터그래프에 의한 공진

수도권 전동차와 같이 다수 팬터그래프가 주행할 때에 후부 팬터그래프에 의해 가선과 팬터그래프의 진동이 증가하는 현상이 있다. 이 결과로 인하여 아크를 동반하는 큰 이선이 발생하고 집전계통의 소음 증가와 전차선의 국부마모를 발생시키는 문제로 이어진다.

이처럼 다수 팬터그래프의 공진은 경간 길이 이상의 임의의 팬터그래프 간격에서 생기고 조건에 따라서는 고속에서도 일어난다.

고속에서 공진이 발생하게 되면 이선이 커지며 양호한 집전성능을 보장하기 어렵다. 그 대책 방안으로서는

(i) 고속 정상주행속도에서 공진이 생기지 않도록 팬터그래프를 배치한다.

(ii) 팬터그래프와 가선에 댐퍼를 취부하는 것이 효과적이다.

(3) 단 팬터그래프에 의한 공진

팬터그래프가 1개인 경우에도 팬터그래프의 진동이 커지는 경우가 있으며, 이 경우에서도 대이선이 발생한다. 특히 짧은 경간의 가선구조에서 발생할 가능성이 크며, 전류용량이 큰 직류 전철화구간에서는 팬터그래프의 용단과 집전판 마모의 요인이 될 수 있으므로 주의가 필요하다.

이러한 공진현상의 발생을 억제하여 집전성능을 향상시키는 방법으로는 계통의 감쇠정수를 크게 하는 것이 효과적이다.

(4) 집전성능 평가

집전성능의 판단기준으로 이선보다는 접촉력에 대한 통계분석이 사용되고 있다. 접촉력 통계는 측정치 또는 계산값으로부터 쉽게 구할 수 있으며, 다음과 같은 파라미터가 주로 사용된다.

- 평균접촉력(F_m), 접촉력 범위 ($F \pm 3\sigma$), 통계적 이선, 이선이 일어날 수 있는 통계적 접촉력(예 : 40N), 가동브라켓트의 최대 압상량

또한 유럽 각국의 집전성능 판단기준은 평균접촉력 및 표준편차를 병합해서 정하거나 이선으로 정하기도 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 권삼영 외, "전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구 (Ⅲ)(고속철도 전차선로 설계요소기술 분석 및 성능시험기술)", 한국철도기술연구원, 1998. 12,
- [2] 한국철도기술연구원, "기존선 이용에 따른 제반기술 연구(대구-부산간 기존 경부노선에 고속열차 운행시 제 기술 검토)", 한국고속철도건설공단, 1998. 12,
- [3] CEGELEC, 경부고속전철 Catenary Basic Design Training 교재, 10, 1995
- [4] 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
- [5] 鐵道綜合技術研究所 編, "電車線とパンタグラフの特性", 財團法人 研友社, 1993, 10