

집전성능 향상을 위한 팬터그래프-전차선의 주요 설계 파라미터분석

Analysis of the Major Design Parameters of a Pantograph-Railway Catenary System for Improving the Current Collection Quality

조용현*

Yong Hyeon Cho

Abstract Stiffness variations and wave propagation/reflection in railway catenaries are the primary sources of contact loss between a pantograph and a railway contact wire. This paper analyzes which design parameter is more important for 200km/h conventional rail and 300km/h high-speed rail, in order to effectively reduce the contact loss. For the high-speed rail, the wave propagation and reflection in the overhead contact lines are more influential than the stiffness variation over a span. When the high-speed rail needs to speed-up, it is necessary to develop higher strength contact wires in order to increase the wave propagation speed. In addition, the dropper clamp mass should be reduced in order to alleviate the wave reflection. However, it is noted that the increase in the tension to a messenger wire could deteriorate the current collection quality, which contrasts with expectations. For the 200km/h conventional rail, the stiffness variation over a span is more influential than the wave propagation and reflection. Therefore, shortening span length, increasing the tension in the contact wire and optimizing the location of the droppers are recommended for a smoother stiffness variation over the span.

Keywords : Overhead contact lines, Pantograph, Current collection quality, Contact force, Design parameters

초 록 팬터그래프와 전차선 사이의 이선을 유발하는 주요 요인은 팬터그래프로 인하여 전차선에 야기되는 파동의 전파와 반사 그리고 열차 진행방향의 전차선로 강성변화이다. 본 논문의 목적은 200km/h급 일반철도와 300km/h급 고속철도에서 이선을 효과적으로 줄이기 위하여 앞서 언급하였던 두 가지 요인 중에서 어느 쪽을 중요하게 고려해야 하는지를 분석하는 것이다. 고속철도 경우에는 파동의 전파와 반사가 강성 변화에 비하여 집전성능에 영향을 더 크게 미친다. 증속을 위해서는 드로퍼 경량화와 전차선 고 장력 부여를 위한 고 강도 전차선 개발이 필요하다. 파동전파속도를 향상하기 위하여 조가선의 장력을 증가시키면 오히려 집전성능을 악화할 수 있음에 유의해야 한다. 200km/h급 일반철도의 경우에는 전차선로 강성 변화가 파동 전파 및 반사에 비하여 집전성능에 영향을 더 미치므로 강성변화를 완화시키기 위하여 경간길이 축소, 전차선로의 장력 증가 및 드로퍼 배치 최적화가 필요하다.

주요어 : 전차선로, 팬터그래프, 집전성능, 접촉력, 설계 파라미터

1. 서 론

열차는 전기, 디젤 및 가스터빈의 3가지 종류의 동력방식을 사용하고 있다. 전기방식은 타 방식에 비하여 가·감속 능력이 뛰어나고 환경친화적인 장점을 가지고 있으므로 한국형 고속열차와 틸팅열차는 전기 동력방식을 택하고 있다. 고속으로 주행하는 열차의 지붕에 탑재된 팬터그래프(Pantograph)는 전차선(Contact wire)과 미끄럼 접촉을 통하여 열차 구동에 필요한 전기 에너지를 공급 받는다. 열차는 전기, 디젤 및 가스터빈의 3가지 종류의 동력방식을 사용하고 있다. 전기방식은 타 방식에 비하여 가·감속이 뛰어나고 환경친화적인 장점을 가지고 있으므로 한국형 고속열차와 틸

팅열차는 전기동력 방식을 택하고 있다. 고속으로 주행하는 열차의 지붕에 탑재된 팬터그래프(Pantograph)는 전차선(Contact wire)과 미끄럼 접촉을 통하여 열차 구동에 필요한 전기 에너지를 공급 받는다.

전차선로는 전차선과 조가선 그리고 전차선을 조가선에 걸 어주는 드로퍼로 구성되어 있다. 열차가 주행하면서 팬터그래프와의 접촉을 통하여 전차선으로부터 안정적으로 전력을 공급받을 수 있는 능력을 집전성능(Current collection quality) 이라고 한다. 열차의 속도가 증가하면 전차선로(Overhead contact line)의 경간 중앙과 지지점에서의 높이차, 전차선에서의 경점(Hard point), 곡부 마모, 전선 진동 등에 의하여 전차선과 팬터그래프 사이에 이선(Loss of contact)이 발생 하게 된다. 이선이 자주 일어나면 전차선과 팬터그래프 집 전판이 마모되고, 스파크 발생으로 인하여 아크 소음과 전 자기파가 발생하게 된다. 특히, 이선 시간이 길어지면 전력 공급이 중단되어 열차가 일정한 속도를 유지할 수 없게 된

*Corresponding author:

Tel.: +82-31-460-5112, E-mail : yhcho@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.1.7>

다. 따라서, 집전성능은 열차의 안정적인 운행을 위하여 반드시 확보해야 할 중요 성능 중의 하나이므로 집전성능 확보를 위하여 설계 단계에서 팬터그래프와 전차선로의 설계 파라미터에 대한 최적화가 이루어진다.

집전성능은 팬터그래프와 전차선의 동적 상호작용에 의하여 결정되므로 집전성능을 예측하기 위하여 팬터그래프-전차선의 동적 상호작용을 해석할 수 있는 다양한 시뮬레이션 기술이 개발되어 왔다. 최근에는 전차선로의 형상을 거의 그대로 모사할 수 있는 유한 요소법을 기반으로 한 시뮬레이션 기술이 활발히 개발되고 있다[1-6]. 이러한 시뮬레이션 기술을 활용하여 팬터그래프와 전차선로의 설계 파라미터 최적화 연구[6-8]가 이루어지고 있으나 그 대상이 고속철도에만 국한되는 한계가 있다. 실제로, 집전성능은 경부고속철도와 호남고속철도와 같은 300km/h 이상의 고속철도뿐만 아니라 수도권 광역급행철도와 같은 200km/h 급 일반철도에서도 중요하므로 본 논문에서는 300km/h급 고속철도 뿐만 아니라 200km/h급 일반철도를 연구대상으로 선정하였다. 차량에 있어서는 KTX 열차는 경부고속철도 뿐만 아니라 호남선 등 일반철도에서 운영되므로 KTX 열차를 연구대상으로 하였다.

팬터그래프와 전차선 사이의 이선을 유발하는 주요 요인은 팬터그래프로 인하여 전차선에 야기되는 파동의 전파와 반사와 열차 진행방향의 전차선로(Railway catenary) 강성변화라고 한다[9]. 본 논문의 목적은 특정 집전시스템(팬터그래프와 전차선로)의 최적 설계점을 찾는 것이 아니라 200km/h급 일반철도와 300km/h급 고속철도에서 이선을 효율적으로 줄이기 위하여 이선을 유발하는 주요 요인, 즉 전차선에서의 파동의 전파와 반사 그리고 전차선로 강성변화 중 어떤 것이 집전성능에 더 큰 영향을 미치는지를 분석하는 것이다. 이를 통하여 200km/h 급 일반철도와 300km/h 이상의 고속철도에서의 집전성능을 개선하기 위하여 집중적으로 검토해야 할 설계 파라미터가 무엇인지를 파악할 수 있을 것이다. 참고문헌[6,7]에 따르면 전차선로의 파동전파속도를 증가시키면 고속에서 이선율을 감소시킬 수 있다고 한다. 전차선과 조가선의 장력을 증가시키면 전차선로에서의 파동전파속도가 증가하나, 전차선과 조가선 각각의 장력 증가가 집전성능 개선에 어떠한 영향을 미치는지가 분석되어 있지 않아, 본 논문에서는 고속철도에서의 전차선과 조가선의 장력 변화가 집전성능과 어떠한 상관관계를 갖게 되는지를 추가적으로 분석하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 본론에서는 집전성능과 관련된 팬터그래프-전차선로 주요 설계 파라미터에 대한 검토와 함께 본 연구에서 사용한 집전성능 예측을 위하여 사용한 팬터그래프-전차선 동역학 시뮬레이션 프로그램 SPOPS(Simulation Program for Overhead contact line-Pantograph System)에 대한 소개 후, 동역학 시뮬레이션을 통하여 200km/h 급 일반철도와 300km/h급 고속철도에서 집전성능 관련 주요 설계 파라미터를 토대로 200km/h급 일반철도에서 뿐만 아니라 고속철도에서 집전성능을 개선할 수 있는 설계방안을 제시하였다.

2. 집전성능 관련 팬터그래프-전차선로 파라미터

전차선로에서의 강성변화는 동적 상호 작용에서 외란으로 작용하여 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력을 변하게 한다. 전차선로의 강성 변화는 두 가지 주기, 즉 경간 길이와 드로퍼 간격을 주기로 변하게 된다. 경간 길이를 주기로 하는 전차선로에서의 강성 변화는 드로퍼 간격을 주기로 하는 강성 변화에 비하여 집전 성능에 미치는 영향이 크다. 경간 길이를 주기로 하는 강성 변화를 유발하는 파라미터들은 경간 길이, 드로퍼의 배치, 전차선 및 조가선 장력, 전차선 사전이도(Pre-sag) 유무 등이 있다. 경간 길이가 길어지거나 전선 장력이 감소하게 되면 경간 중심과 경간 지지점 사이의 강성 변화가 증가하게 된다. 경간 인근의 드로퍼와 지지점 사이의 간격이 가까워지면 경간 주기의 강성 변화는 커지게 된다. 전차선에 작용하는 압상력(Uplift force)이 어느 이상으로 크게 되면 전차선을 지지하는 드로퍼가 느슨해지는 스택(Slacked) 현상이 발생하게 되는데, 느슨한 드로퍼가 있는 곳에서의 국부 강성은 줄어들게 된다. 전차선에 사전이도가 없으면 드로퍼에 작용하는 하중은 해당 드로퍼가 지지하는 전차선의 무게만큼 작용하게 된다. 드로퍼 간격이 일정한 경우에 모든 드로퍼에 같은 크기의 지지하중이 작용하게 된다. 반면에, 전차선에 사전이도가 있으면 경간 인근의 드로퍼에는 큰 지지하중이 작용하고 그 이외의 드로퍼에는 작은 지지하중이 작용하게 된다. 이 경우, 경간 인근의 드로퍼는 쉽게 느슨해지는 현상이 발생하여 사전이도가 없는 전차선로에 비하여 경간 주기의 강성 변화가 클 수 있다. 그러므로, 전차선의 사전이도가 경간 주기의 강성 변화에 영향을 줄 수 있다[10].

전차선로는 전차선과 조가선이 드로퍼로 연결된 2단 구조물이다. 국제철도 규격 UIC799 OR[11]에 따르면 파동전파속도 C 는 전차선 장력 및 선밀도와 전차선 장력 및 선밀도와 관련이 있고 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C = \sqrt{\frac{T_m + T_c}{\rho_m + \rho_c}} \tag{1}$$

여기서 C 는 파동전파속도, T_c 는 전차선 장력, T_m 은 조가선 장력, ρ_c 는 전차선 선밀도, ρ_m 는 조가선 선밀도를 나타낸다.

팬터그래프에 의하여 가해진 외란은 드로퍼에서 반사되어 팬터그래프로 돌아오게 된다. 이러한 파동 반사는 팬터그래프와 전차선 사이에 접촉력 변동을 유발하게 된다. 드로퍼에 의한 파동 반사는 드로퍼 질량과 드로퍼의 특성(강성 및 감쇠값)과 관련이 있다. 열차속도가 파동전파속도에 접근하면 드로퍼에서 반사되어 팬터그래프로 돌아가는 외란의 크기가 증폭되게 된다.

팬터그래프에는 압상력이 작용하여 팬터그래프와 전차선 사이에 접촉력이 작용하게 된다. 접촉력 변동이 압상력을 초과하면 이선이 일어나게 된다. 팬터그래프가 이선 없이 전

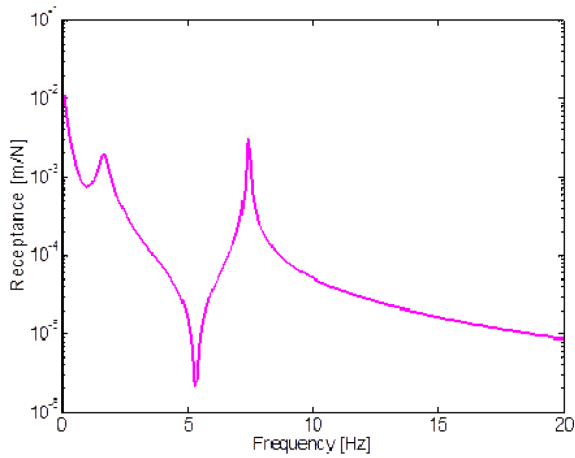


Fig. 1 Receptance of the KTX-GPU pantograph dynamic model represented using three levels of mass-damper-springs

차선의 동적 변위를 추종할 수 있는 주파수별 팬 헤드의 진폭을 주파수별 추종진폭이라 한다. 주파수별 추종 진폭은 (이하 추종 진폭이라 함) 팬터그래프의 리셉턴스(Receptance)에 압상력을 곱한 값이다. 여기서 리셉턴스는 관심의 주파수로 팬헤드를 가진할 때 팬헤드의 수직 변위와 팬헤드에 작용하는 가진력의 비를 말한다. 팬터그래프의 리셉턴스는 팬터그래프의 수준별 질량, 감쇠계수 및 스프링상수에 의하여 결정된다. 3수준의 질량-감쇠기-스프링으로 모델링되는 KTX GPU 팬터그래프의 리셉턴스는 다음 그림에서 보는 바와 같이 2개의 피크를 갖는다.

팬터그래프가 전차선로를 지나면서 주로 받게 되는 외란의 주요 주파수는 경간 통과 주파수(Span-passing frequency)와 드로퍼 통과 주파수(Dropper-passing frequency)이다. 이 선 방지를 위하여 이들 주파수에서 충분히 큰 리셉턴스를 갖도록 팬터그래프의 질량, 스프링, 감쇠값을 선택해야 하는 것이 바람직하다. 또한, 추종 진폭은 앞서 언급한 바와 같이 압상력에 비례하므로 압상력을 크게 하면 집전성능을 개선할 수 있다. 그러나 압상력이 지나치게 크면 전차선에 주게 되는 외란의 크기가 커져서 집전성능이 오히려 악화될 수 있음에 주의해야 한다.

3. 속도변화에 따른 팬터그래프-전차선로 파라미터 분석

3.1 팬터그래프-전차선로 동적 상호작용 시뮬레이션

본 연구에서는 팬터그래프-전차선로의 동적 상호작용에 대한 시뮬레이션을 위하여 SPOPS(Simulation Program for Overhead contact line-Pantograph System) 프로그램을 사용하였다. SPOPS에서는 팬터그래프를 2수준 혹은 3수준의 질량-스프링-댐퍼로 모델링하고, 전차선로를 2절점 Euler-Bernoulli 보 요소를 사용하여 모델링한다. 실제로 전차선의 파동전파속도는 운행속도에 비하여 충분히 커서 전차선과 조가선에서 대 변형률(Large strain)이 발생하지 않으므로 SPOPS

의 유한요소법 정식화는 전차선과 조가선의 길이방향 경사(Slope)이 충분히 작다는 가정하에 이루어졌다[1]. 전차선을 조가선에 걸어주는 드로퍼는 열차가 지나갈 때 드로퍼에 작용하는 힘이 0이 되면 강성을 잃어버리는 특성, 즉 스택(Slack) 상태가 된다. 매 시간 단계마다 모든 드로퍼의 스택 여부를 확인하여 드로퍼의 강성을 조절해 주어야 한다. 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉은 페널티 방법을 사용하여 모델링한다. 사용한 페널티 값은 집전성능 시뮬레이션 프로그램의 검증과 관련된 유럽 규격인 EN 50318[10]에 나와 있는 50000N/m를 사용하였다. SPOPS 프로그램은 하나의 팬터그래프 혹은 다수의 팬터그래프가 동시에 전차선과 접촉하면서 이동하는 경우에 대한 동역학 시뮬레이션이 가능하다. 시뮬레이션 도중에 계산된 접촉력이 음인 경우, 즉 이선이 발생하는 경우에는 페널티 값을 0으로 놓고 팬터그래프와 전차선로의 변위를 다시 계산한다. 다음 시간단계에서는 페널티 값을 50000N/m를 놓고 우선적으로 계산하고 접촉력이 음인 경우에는 다시 페널티 값을 0으로 놓고 계산한다. 팬터그래프와 전차선로가 결합된 운동방정식을 α 방법을 사용하여 수치 시간 적분한다. 보다 상세한 시뮬레이션 절차는 참고문헌 [1]에 나와 있다.

본 연구에서 고려한 팬터그래프-전차선로는 KTX GPU 팬터그래프와 호남선 전차선로이다. KTX GPU 팬터그래프는 KTX 열차에 탑재되어 있는 것으로 동적 시뮬레이션 모델

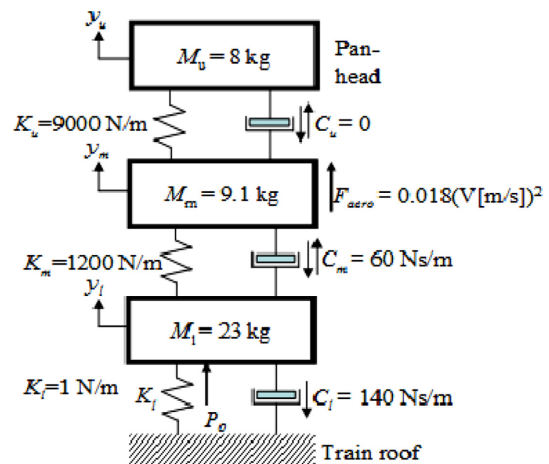


Fig. 2 Simulation model of the KTX GPU pantograph[12]

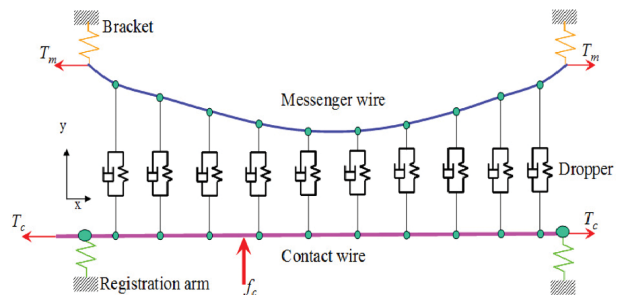


Fig. 3 Simulation model of the Honam railway catenary [1]

과 파라미터값들이 Fig. 2에 나와 있다. KTX 열차는 경부 고속철도 뿐만 아니라 호남선 등 일반철도에서 한대의 팬터 그래프로 열차에 소요되는 동력을 공급한다. 호남선 전차선의 모델은 Fig. 3과 같고 주요 설계 파라미터 값이 Table 1에 나와 있다. 파동전파속도를 식 (1)에 따라서 계산해 보면 호남선 전차선로에서의 파동전파속도는 442km/h가 된다. 경부고속철도 전차선로에 비하면 파동전파속도가 약 30km/h 낮지만 고속철도의 운행속도를 300km/h로 가정한다면 파동 전파속도는 운행속도의 1.5배 정도로 충분히 크다. 따라서, SPOPS 프로그램의 유한요소법 정식화 가정인 전차선의 길이방향 경사(Slope)가 충분히 작다는 가정이 충족하므로 SPOPS 프로그램을 사용하여 호남선 전차선로를 대상으로 고속 운행에 따른 집전성능의 특성 변화를 분석하는 것은 타당하다고 판단된다.

본 논문의 목적은 특정 집전시스템의 최적 설계점을 찾는 것이 아니라 200km/h급 일반 철도와 300km/h급 고속철도에서 이선을 유발하는 주요 요인, 즉 전차선에서의 파동의 전파와 반사 그리고 전차선로 강성변화 중 어떤 것이 집전 성능에 더 큰 영향을 미치는지를 분석하는 것이다. 따라서, 이선의 주요 요인을 식별하는 것이 논문의 목적이므로 설계 파라미터에 세밀한 변화를 주는 대신에 Tabel 1에서 볼 수 있는 바와 같이 설계 파라미터의 큰 변화(KTX GPU 팬터 그래프와 호남선 전차선로의 원래 값을 Baseline으로 취하고, Baseline에서 +20% 증가된 값, Baseline에서 -20% 감소된 값을 취함)를 취하였다.

전차선로 동역학 시뮬레이션 모델은 EN 50318에 따라서 10경간의 모델을 사용하였고, 5번째와 6번째 경간에서 얻은 접촉력 해석결과를 20Hz Cut-off 주파수로 하여 저주파수 필터링을 하였다. 팬터그래프와 전차선의 접촉점에서 발생하는 접촉력은 전차선로에 파동을 유발하고 이는 주변으로 전

Table 1 Variation of the design parameters of KTX GPU pantograph - Honam railway catenary

Parameter	-20%	Baseline	+20%
Span length, S	40m	50m	60m
Tension of contact wire, T_c	9600N	12000N	14400N
Density of contact wire, ρ_c	0.79kg/m	0.987kg/m	1.18kg/m
Tension of messenger wire, T_m	9600N	12000N	14400N
Density of messenger wire, ρ_m	0.484kg/m	0.605kg/m	0.726kg/m
Dropper mass, including clamp, m_d	0.32kg	0.4kg	0.48kg
Pan-head mass, M_u	6.4kg	8kg	9.6kg
Plunger mass, M_m	7.28kg	9.1kg	10.92kg
Pan-head spring, K_u	7200N/m	9000N/m	10800N/m
Plunger spring, K_m	960N/m	1200N/m	1440N/m
Damper between a frame and a roof, C_l	112Ns/m	140Ns/m	168Ns/m

파되어 전차선로 모델의 경계에서 반사되어 다시 팬터그래프와 전차선의 접촉점으로 돌아오게 된다. 이러한 모델 경계면에서 파동 반사에 의한 팬터그래프와 전차선의 접촉점에서의 동적 상호작용에 미치는 영향을 배제하기 위하여 10경간의 전차선로 모델에서 얻은 결과 중에서 5번째와 6번째 경간에서 얻은 접촉력만을 사용하여 집전성능을 평가하였다. 집전성능은 통상적으로 통계적 최소접촉력으로 평가한다. 접촉력 시뮬레이션 결과가 정규분포를 가진다면 통계적 최소접촉력은 평균접촉력에서 표준편차를 3배한 값을 빼 값으로 할 수 있다. 평균접촉력은 팬터그래프에 작용하는 압상력과 관계가 되므로 대체로 일정하다고 볼 수 있으므로 본 논문에서는 접촉력의 표준편차가 크면 집전성능이 나빠지는 것으로 보고 해석결과를 평가하였다

3.2 시속 300km의 경우 팬터그래프-전차선로 파라미터 분석

팬터그래프-전차선로의 모든 파라미터를 대상으로 집전 성능에 미치는 영향을 분석하는 것은 곤란한 일이므로 설계 파라미터 중에서 대표성을 가진 것들을 선택하여 이들의 상대적 중요성에 대하여 분석하였다.

전차선로에서 강성 변화는 경간 길이를 주기로 하는 변화가 드로퍼 간격을 주기로 하는 변화보다 크므로 전차선로의 강성 변화를 나타내는 설계 파라미터로 경간 길이 S 를 선택하였다. 팬터그래프가 전차선과 직접 접촉을 하므로 전차선에서의 파동 전파와 관련된 설계 파라미터로 전차선의 장력 T_c 과 선밀도 ρ_c 를 선택하였다. 드로퍼에 의한 파동 반사와 관련된 설계 파라미터로 드로퍼의 질량 m_d 를 선택하였다. 팬터그래프에서는 추종 특성에 영향을 미치는 팬헤드 질량 M_u , 플런저 질량 M_m , 팬헤드 지지 스프링 K_u , 플런저 스프링 K_m , 프레임과 열차 지붕 사이의 감쇠기 C_l 를 선택하였다.

설계 파라미터의 변화가 접촉력 표준편차에 미치는 영향이 Fig. 4에 나와있다. 그림에는 각 파라미터별로 3개의 막대 그래프가 표시되어 있는데 오른쪽 막대 그래프는 파라미터가 Baseline에서 +20%될 때, 가운데 막대 그래프는 파라

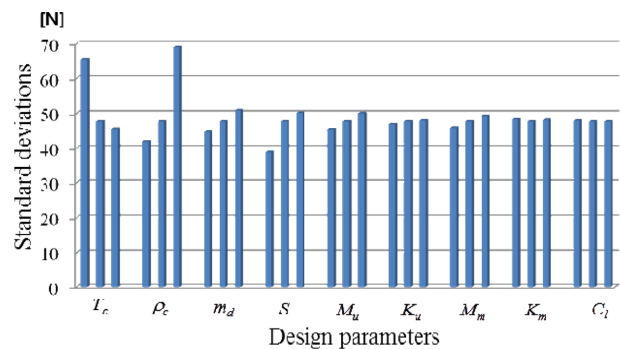


Fig. 4 Effect of the parameters of the pantograph-overhead contact lines on the standard deviation of the contact forces at 300km/h (left: -20%, center: baseline, right: +20%)

미터가 Baseline일 때, 왼쪽 막대 그래프는 파라미터가 -20% 일 때의 접촉력 표준편차를 나타낸다. Fig. 4를 보면 전차선로 설계 파라미터가 팬터그래프 설계 파라미터에 비하여 접촉력 변동에 더 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이것은 과거의 연구[6-9]와 잘 일치하는 것이다. 집전성능에 가장 큰 영향을 주는 파라미터는 전차선 장력과 전차선 밀도이다. 그 다음으로 영향을 주는 파라미터들은 경간 길이, 드로퍼 질량, 팬헤드 질량, 플러저 질량이다. 전차선 장력과 전차선 밀도는 전차선에서의 파동전파속도와 관련이 있고 경간 길이는 강성 변화와 관련이 있다. 그러므로, 열차속도가 300km/h일 경우 전차선에서의 파동 전파가 전차선의 강성 변화에 비하여 집전성능에 상대적으로 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 또한, 드로퍼 질량이 집전성능에 미치는 영향이 크다는 것은 드로퍼에서의 파동 반사가 중요하다는

것을 의미한다. 드로퍼에서의 파동 반사에 의한 이선을 줄이기 위하여 드로퍼 질량 및 팬터그래프 질량을 경량화하는 것이 필요하다.

팬터그래프에서는 전차선로와 마찬가지로 질량이 집전성능에 큰 영향을 주는 반면에 스프링과 감쇠기는 다른 파라미터에 비하여 상대적으로 덜 집전성능에 영향을 주고 있다.

지금부터는 300km/h급 전차선로를 대상으로 전차선 장력, 전차선 선밀도, 조가선 장력 그리고 조가선 선밀도의 변화가 접촉력 표준편차와 어떤 관계를 가지고 있는가를 살펴볼 것이다. 이상과 같은 4가지 인자의 영향을 분석하기 위하여 사용한 방법은 요인배치법(Factorial design)으로 각 인자별로 2가지 수준을 갖는 것으로 가정하였다. Table 2가 보여주는 바와 같이 KTX 전차선로의 원래 값에서 -20% 한 값을 수준 1로, +20% 한 값을 수준 2로 가정하였다.

Table 2 Two levels of the design parameters of the KTX railway catenary for the factorial design

Parameter	Level 1 (Baseline -20%)	Level 2 (Baseline +20%)	Remark
Tension of contact wire, T_c	9600N	14400N	Baseline is KTX overhead contact line
Density of contact wire, ρ_c	0.79kg/m	1.18kg/m	
Tension of messenger wire, T_m	9600N	14400N	
Density of messenger wire, ρ_m	0.79kg/m	1.18kg/m	

Table 3에 4개의 요인이 각각 2 가지의 수준을 갖는 총 16개의 경우가 나와 있다. 표에서 -1은 파라미터의 수준 1을 나타내고, +1은 파라미터의 수준 2를 나타낸다. 16개 경우에 대하여 팬터그래프가 10개의 경간을 가진 전차선로를 지나는 동안 발생하는 접촉력을 시뮬레이션한 후 경간 5와 6의 접촉력 해석결과를 20Hz Cut-off 주파수로 저주파수 필터링을 하여 접촉력의 표준편차를 구하였다. Table 3의 우측 마지막 열(Column)에는 각 경우에 대한 접촉력의 표준편차가 나와 있다. 이상과 같은 요인배치법에 따른 파라미터의 영향도를 계산한 값이 Table 3의 마지막 행(Row)에 나와 있다. 이 값은 설계 파라미터의 변화가 접촉력 표준편차에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 나타낸다. 전차선 장력과 전차선 밀도는 접촉력 표준편차에 큰 영향을 주는 반면에 조가선 장력과 조가선 밀도는 표준편차에 미미한 영향을 미친

Table 3 Factorial design for the sensitivity analysis of the parameters with a contact wire and a messenger wire

	T_c	T_m	ρ_c	ρ_m	$T_c T_m$	$T_c \rho_c$	$T_c \rho_m$	$T_m \rho_c$	$T_m \rho_m$	$\rho_c \rho_m$	$T_c T_m \rho_c$	$T_c T_m \rho_m$	$T_c \rho_c \rho_m$	$T_m \rho_c \rho_m$	$T_c T_m \rho_c \rho_m$	Values
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	48.6
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	33
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	59.8
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	27.7
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	68.9
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	37.4
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	60.7
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	38.1
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	41.1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	25.1
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	51
12	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	28.2
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	67.4
14	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	38
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	66.6
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	39.7
Coeff	-12.31	0.8	6.39	-1.07	-0.74	-1.49	-0.42	-1.59	0.97	1.89	2.17	0.21	-0.69	0.08	-1.01	

다. 전차선 장력이 증가하거나 전차선 선밀도가 감소하면 표준편차는 줄어들게 됨을 알 수 있다. 반면에 조가선 장력이 증가하거나 혹은 조가선 선밀도가 감소하게 되면 식 (1)에 의하여 계산된 파동전파속도는 증가하지만 접촉력 표준편차를 줄이는 데에 크게 효과가 없다는 것이다.

다음으로 동일한 파동전파속도를 갖는 두 가지 전차선로에 대한 시뮬레이션을 통하여 전차선로에서 전차선 장력과 조가선 장력이 집전 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 고려하는 두 가지 전차선로는 Table 4에 나와 있다. 하나는 초기 처짐량을 제외하고는 KTX 전차선로와 동일한 것이고 다른 하나는 식 (1)에 의한 파동전파속도가 KTX 전차선로와 같도록 전차선 장력을 줄이고 조가선 장력을 증가시킨 것이다. 팬터그래프가 10개의 경간의 전차선로를 지나는 동안 발생하는 접촉력을 시뮬레이션한 결과가 Table 4에 나와 있다. 전차선 장력을 줄이는 대신에 조가선 장력을 증가시키면 접촉력 표준편차는 증가한다는 것을 보여 준다. 따라서, 집전 성능을 확보하기 위해서는 조가선의 장력을 증가시키는 대신에 전차선의 장력을 증가시키거나 전차선의 선밀도를 감소시키는 것이 바람직하다. 전차선은 사용 중에 마모가 발생하므로 파동전파속도를 향상하기 위하여 전차선의 단면적을 줄이는 것은 통전 용량 확보 측면에서 바람직하지 않다. 그러므로, 속도향상을 위해서는 전차선 장력을 증가시키는 것이 필수적이므로 전차선 소재를 새로 개발하여야 한다. 시속 300km급 KTX 전차선로에는 20kN의 장력이 걸려 있는데 이 정도의 장력에는 순동으로 만든 전차선을 사용하더라도 강도상의 문제가 없다. 하지만 시속 400km까지 증속하기 위해서는 전차선에 34kN의 장력 부여가 필요하므로 순동 대신 고강도 소재의 전차선이 필요하다. 호남고속철도에 설치될 시속 400km급 전차선로 Test-bed에는 시속 300km 전차선과 비교하여 70% 정도까지 강도가 향상된 Mg합금 전차

Table 4 Simulation results of the KTX GPU pantograph-KTX railway catenary with wire tension exchanged at 300km/h

	Comparison items	KTX overhead contact lines	Variant
Input data	Contact wire tension	20000N	14000N
	Messenger wire tension	14000N	20000N
Result	Mean value of contact force	197.0N	200.9N
	Standard deviation of contact force	41.5N	59.4N
	Statistical maximum of contact force	321.5N	379.1N
	Statistical minimum of contact force	72.5N	22.7N
	Vertical displacement at support	81.6mm	121.0mm
	Strain of contact wire at support	436ue	1104ue

선이 개발되어 적용될 것이다.

3.3 시속 200km 의 경우 팬터그래프-전차선로 파라미터 분석

열차속도가 200km/h라는 점을 제외하고는 2.2절과 마찬가지로 조건에서 팬터그래프-전차선로 파라미터가 접촉력 표준편차에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과가 Fig. 5에 나와 있는데 열차속도가 300km/h일 때와 마찬가지로 전차선로 파라미터가 팬터그래프 파라미터에 비하여 접촉력 변동에 더 크게 영향을 준다는 것을 보여주고 있다.

전차선로에서 집전 성능에 가장 큰 영향을 주는 파라미터는 경간 길이이다. 경간 길이가 길어짐에 따라서 강성 변화가 증가하므로 접촉력 표준편차가 커진다. Fig. 4와 5에 따르면 경간 길이의 변화에 따른 접촉력 표준편차는 200km/h에서 12.2N, 300km/h에서 11.3N으로 속도가 증가하더라도 크게 변동이 없다는 것을 알 수 있다. 그 다음으로 영향을 주는 파라미터들은 전차선 밀도, 전차선 장력, 드로퍼 질량의 순이다. 이것은 열차속도가 300km/h일 경우와 달리 전차선의 강성 변화가 전차선에서의 파동 전파와 파동 반사에 비하여 집전 성능에 상대적으로 더 큰 영향을 준다는 것을 보여 주는 것이다.

팬터그래프에서는 플런저 스프링 K_m 의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 플런저 스프링은 경간 주기의 외란에 대한 팬터그래프의 추종 특성에 영향을 미친다. 앞서 언급한 바와 같이 열차속도가 200km/h일 때 전차선의 강성 변화가 집전 성능에 영향을 크게 미치므로 경간 주기 외란에 대한 추종과 관련된 플런저 스프링이 집전 성능에 영향을 크게 미친다고 설명할 수 있다. 감쇠기 C_l 은 감쇠값이 증가함에 따라서 접촉력 표준편차가 작아진다.

이는 시속 200km 근방에서 호남선 전차선로에서는 서브하모닉 공진(Sub-harmonic resonance)가 발생[9]하므로 감쇠값이 증가함에 따라서 동적 상호 작용이 안정화된다는 것을 의미한다.

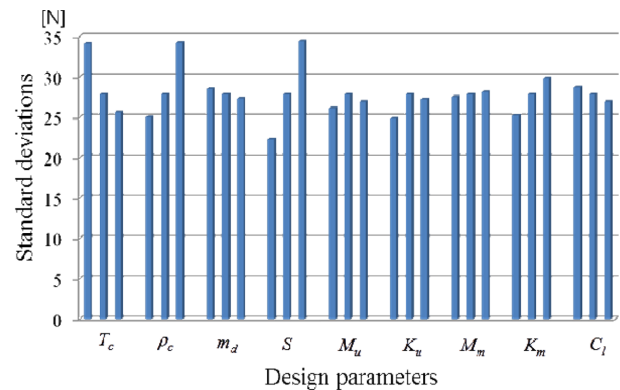


Fig. 5 Effect of the parameters of the pantograph-overhead contact lines on the standard deviation of the contact forces at 200km/h (left: -20%, center: baseline, right: +20%)

따라서, 열차속도가 200km/h일 경우에는 전차선로의 설계 관점에서 보면 이선 방지를 위하여 장력을 증가시키거나 드로퍼 배치를 최적화하여 전차선로의 강성 변화를 최소화하거나 전차선로 강성 변화를 보상하기 위하여 전차선에 초기 처짐(Pre-sag)을 부여할 수 있다. 팬터그래프의 설계 관점에서 보면 200km/h일 경우에는 서브하모닉 공진이 발생할 수 있으므로 충분한 용량의 감쇠기를 선정하는 것과 경간 길이 주기의 외란에 팬터그래프가 잘 추종할 수 있도록 플러저 스프링 상수를 적절히 선택하는 것이 필요하다.

4. 결 론

집전성능 향상을 위한 팬터그래프-전차선로 파라미터의 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전차선로 파라미터는 팬터그래프 파라미터에 비하여 집전성능에 영향을 더 크게 미친다.

2. 열차속도가 300km/h일 경우에는 전차선로에서의 파동 전파·반사가 강성 변화에 비하여 집전성능에 영향을 더 크게 미치므로 전차선의 장력을 증가시키거나 전차선의 선밀도를 감소시켜서 열차 속도가 전차선 파동전파속도의 70% 이내가 되도록 하는 것이 바람직하다. 조가선의 장력을 증가시키면 오히려 집전성능을 악화할 수 있으므로 조가선의 장력은 시뮬레이션을 통하여 적정 장력을 부여하는 것이 바람직하다. 고속열차의 증속을 위해서는 고 장력에도 견딜 수 있는 고강도 소재의 전차선을 개발하는 것이 필수적이다. 시속 400km 급 전차선로 Test-bed가 호남고속철도에 구축될 예정이므로 이를 위하여 시속 300km급 전차선 대비 70% 강도가 향상된 Mg Cu 전차선이 개발되고 있다. 아울러서 드로퍼에서의 파동반사가 집전성능에 미치는 영향이 크므로 시속 400km급 전차선로에 적용될 드로퍼 크램프의 경량화를 추진하고 있다.

3. 열차속도가 200km/h일 경우에는 전차선로의 강성 변화가 파동 전파 및 반사에 비하여 집전성능에 영향을 더 미치므로 강성변화를 완화시키기 위하여 경간길이 축소, 전차선로의 장력 증가 및 드로퍼 배치 최적화를 하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 국토교통부 미래철도사업 『증속에 따른 전차선로 시스템 기술개발』의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

[1] Y.H. Cho (2008) Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper, *Journal of Sound and Vibration*, 315(3), pp. 433-454.

[2] J. Lee and T. Park (2012) A Study on efficiency improvement of the catenary-pantograph dynamic interaction analysis program using shift forward method, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(6), pp. 572-578.

[3] J. Seo, I. Jung, T. Park, J. Mok, et al. (2005) Dynamic analysis of a pantograph-catenary system for high-speed train(I. modeling and analysis of a catenary system), *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 22(1), pp. 152-159.

[4] S.P. Jung, T. Park, Y.G. Kim, C.K. Park and J.S. Paik (2011) Analysis of the current-collection performance of a high-speed train using finite element analysis method, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, A 35(7), pp.827-833.

[5] J. Lee and T. Park (2012) Development and verification of a dynamic analysis model for the current-collection performance of high-speed trains using the absolute nodal coordinate formulation, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, A 36(3), pp.339-346.

[6] J. Lee and T. Park (2012) A Study on the estimation and improvement of the current collection performance for the next generation high-speed train (HEMU-430X), *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(5), pp. 429-435.

[7] H. Han (2003) Simulation-based parametric study of the current collection system of high speed trains, *Journal of the Korean Society for Railway*, 6(4), pp. 279-285.

[8] J. Lee and T. Park (2011) Performance evaluation and sensitivity analysis of the pantograph for the high-speed train using finite element analysis method, *Autumn Conference Proceeding of the Korean Society for Railway, Jeju Lamada Plaza Hotel*, pp. 1874-1880.

[9] Y.H. Cho, K. Lee, Y. Park, B. Kang and K. Kim, Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary (2010) *International Journal of Mechanical Science*, 52(11), pp. 1471-1490.

[10] EN 50318 (2002) Railway applications – validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line, BS EN.

[11] UIC Code 799 OR (2002) Characteristics of a.c. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds of over 200 km/h, International Union of Railways.

[12] ERRI A 186/ RP 1 (1996) Simulation of the dynamic behavior of the overhead/pantograph system(two pantograph raised, ERRI.

접수일(2013년 6월 28일), 수정일(2013년 11월 22일),
게재확정일(2013년 11월 28일)

Yong Hyeon Cho : yhcho@krii.re.kr

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheldo bakmulkwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea