

고속전철 집전용 팬터그래프의 동적 추종 특성 향상에 관한 연구

조용현*·권태수*·최강윤*·김석원*

A Study on the Enhancement of Dynamic Follow-up Characteristics of a Pantograph for High-speed Trains

Yong Hyeon Cho, Taesoo Kwon, Kangyoun Choe, Seogwon Kim

Key Words: Pantograph(팬터그래프), Loss of contact(이선), Contact forces(접촉력)

Abstract

Pantographes should follow periodical motions with hanger and span passing frequencies during operation in order to have good dynamic follow-up characteristics. According to the dynamic simulations of a pantograph together with catenary systems, the best current collection performance of a pantograph is obtained when receptance peak frequencies are matched with hanger and span passing frequencies. Based on this principle, design variables of G7 pantograph are selected. However, because a high-speed train may run in the wide range of speeds and induce aero-acoustic noises, the design variables are adjusted to escape from these problems with a little sacrifice of current collection performance.

1. 서론

고속전철은 구동원으로 전력을 사용하고 있어 집전 성능(Current collection performance)의 확보는 고속으로의 속도 향상에 필수적으로 요구된다. 국내에서는 최고 운행속도 350 km/h를 목표로 하는 고속전철 개발의 일환으로 고속용 저이선(Loss of contact) G7 팬터그래프가 개발되고 있다.

본 연구에서는 집전 성능에 영향을 미치는 G7 팬터그래프와 전차선로의 설계 변수를 검토해보고, 경부고속철도에서 고속으로 운용 가능한 팬터그래프의 설계를 위하여 설계 변수의 가용 범위 내에서 팬터그래프의 추종 특성이 최적인 점을 시뮬레이션을 통해 찾아 보았다.

2. 고속용 집전시스템의 개요

2.1 고속용 전차선로

경부고속철도에 설치되는 고속용 전차선로는 Fig 1에 나와 있는 심플 카티너리 방식으로 전차선에는 20 kN, 조가선에는 14 kN의 장력이 걸려 있다. 전차선은 Hard drawn copper로 된 전선으로 단면적이 150 mm²이고, 선밀도는 1.332 kg/m이며, 조가선은 황동으로 만든 꼬임선으로 단면적이 65 mm²이고, 선밀도는 0.605 kg/m이다. 표준 경간 길이로는 27 ~ 63 m의 다양한 범위를 갖고 있다. 경부고속철도 시험선 구간(천안~대전)에 설치되어 있는 전차선로의 경간 길이를 분석한 결과에 따르면 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 터널 구간이 40 %, 교각이 39 %, 기타 지반 구간이 21 %로 구성되어 있다. 교각 및 터널 구간에서의 경간 길이는 대부분 40 ~ 50 m이고, 지반 구간에서는 40 m에서 63 m까지 다양하게 사용된다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원 yhcho@krri.re.kr
 * 한국철도기술연구원 선임연구원 tskwon@krri.re.kr
 * 한국철도기술연구원 책임연구원 kchoe@krri.re.kr
 * 한국철도기술연구원 선임연구원 swkim@krri.re.kr

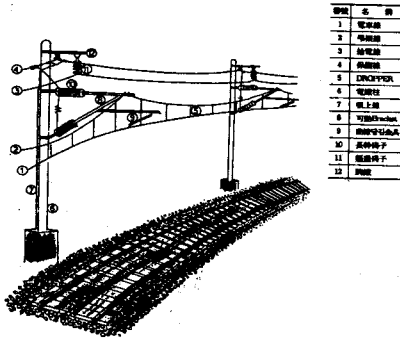


Fig.1 Configuration of KTX catenary system

Table 1 catenary system of KTX test track

구분	경간 길이 구성	비고
교각 구간	40m(229개), 50m(73개), 45m(12개), 48m(11개) 등	39% 차지
터널 구간	40m(245개), 48m(153개), 38m(22개) 등	40% 차지
지반 구간	40m(37개), 58m(31개), 54m(24개), 45m(11개), 63m(10개), 50m(8개) 등	21% 차지

2.2 고속용 팬터그래프

경부고속철도에 투입될 KTX 열차에 탑재된 팬터그래프는 Fig 2에 나와 있는 GPU 팬터그래프다. 일반적으로 고속용 팬터그래프는 2원계 대신 3원계의 동적 모델을 취하도록 설계함으로써 추종 특성을 향상시키고 있다. GPU 팬터그래프 뿐만 G7 팬터그래프는 Fig 3에서 보는 바와 같이 3원계의 동적 특성을 갖고 있다.

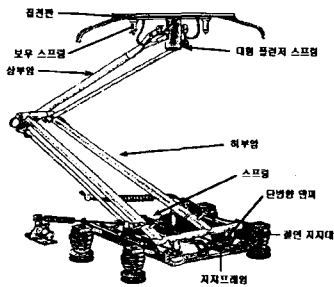


Fig 2 GPU pantograph

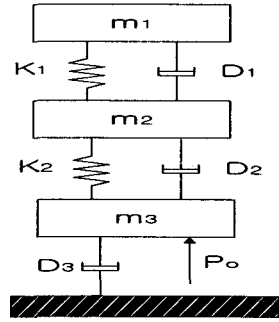


Fig 3 Dynamic model of the pantograph

3. 팬터그래프 추종 특성

3.1 접촉력 변동 관련 이론식

Fig 4와 같이 전차선을 파장 λ , 요철의 진폭 a 를 갖는 무한 길이의 현으로 가정할 때 팬터그래프가 v 로 전차선과 접촉하면서 주행하는 경우에 요철에 의한 접촉력 변동 F_1 은 식(1)과 같이 쓸 수 있고, 팬터그래프에 의해 여기된 파동이 전방으로 진행하였다가 반사되어 돌아와 팬터그래프에 입사하는 파동에 의한 접촉력 변동 F_2 는 식(2)와 같이 쓸 수 있다[1].

$$|F_1| = |\mu| |Z_T| a \omega_0 \quad (1)$$

$$|F_2| = \frac{1+\beta}{1-\beta} |\mu|^2 |\gamma_R| |Z_T| a \omega_0 \quad (2)$$

여기서 $\mu = Z_p / (Z_T + Z_p)$, $\omega_0 = 2\pi v / \lambda$, $\beta = v/c$ 이고 Z_p , Z_T 는 팬터그래프와 전차선의 기계적 임피던스이다.

3.2 전차선로촉에서의 영향

3.2.1 파동전파속도

전차선을 전파하는 횡 변위의 파동전파속도, c 는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$c = \sqrt{(T + \sqrt{T^2 + 4\rho EI \omega^2}) / 2\rho} \quad (3)$$

여기서 T 는 장력이고 ρ 는 선밀도, EI 는 굽힘강성, ω 는 파동의 진동각주파수이다.

ω 혹은 EI 가 충분히 작고, $4\rho EI \omega^2$ 이 T^2 에 비해 무시할 수 있는 경우 파동전파속도는 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$c = \sqrt{T/\rho} \quad (4)$$

전차선의 횡 변위 거동은 비교적 낮은 주파수

에서도 취급이 가능하므로 전차선의 파동전파속도는 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

주행 속도 대 파동전파속도의 비가 접촉력 변동은 Fig 5에 나와 있는데 주행 속도가 파동전파속도에 가까워지면 급속히 접촉력 변동이 커짐을 즉 이선이 증가함을 알 수 있다.

실제로 팬터그래프의 주행 속도가 파동전파속도의 0.7~0.8배를 넘어서게 되면 팬터그래프의 이선이 급격히 증가하는 경향이 있다고 한다[2].

3.2.2 반사계수

반사계수는 반사파의 진폭 대 입사파의 진폭비로 정의되며 수식으로 쓰면 식(5)와 같다.

$$\gamma_R = -\frac{Z_M + m_T i \omega}{Z_T + Z_M + m_T i \omega} \quad (5)$$

여기서 Z_M , Z_T 는 조가선, 전차선의 기계적 임피던스, m_T 는 전차선 질량, i 는 허수이다.

$m_T \omega \ll Z_M$ 을 만족하면 반사계수는 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_R = -\frac{Z_M}{Z_T + Z_M} = -\frac{\sqrt{\rho_M T_M}}{\sqrt{\rho_T T_T} + \sqrt{\rho_M T_M}} \quad (6)$$

여기서 ρ_M , ρ_T 는 조가선, 전차선의 선밀도이고 T_M , T_T 는 조가선, 전차선의 장력이다.

조가선의 장력이 전차선의 장력에 비해 크게 되어 반사계수가 커지게 되면 식(4)에 의한 접촉력 변동이 커지게 된다.

Fig 6에서 볼 수 있듯이 헤비콤파운드 가선에서는 반사계수가 커 행거를 지날 때 접촉력 변동이 큰 반면에 심플 카티너리 가선에서는 반사계수가 작아 행거를 지날 때의 접촉력 변동은 상대적으로 작으나 경간을 지날 때의 접촉력 변동이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

3.2.3 전차선의 기계적 임피던스

가진점에서의 기계적 임피던스 Z_0 는 진동을 유발하는 힘과 진동 속도의 비로 정의되며 기계적 임피던스의 물리적 의미는 얼마나 물체가 움직이기 어려운가를 나타내는 양이다. 기계적 임피던스는 저속에서는 무한 길이의 현이 갖는 임피던스 즉 $Z_0 = 2\sqrt{\rho_T T_T}$ 와 거의 일치하다가 속도가 증가하여 파동전파속도에 근접하면 Z_0 의 1.5배까지 증가한다고 한다[2].

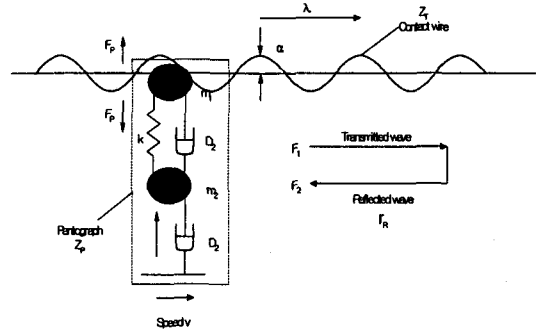


Fig 4 Dynamic interface model of a pantograph and a contact wire

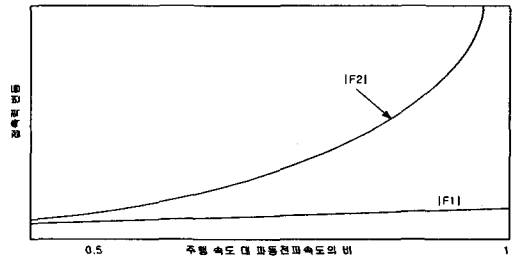


Fig 5 Effects of running speeds on the variations of contact forces

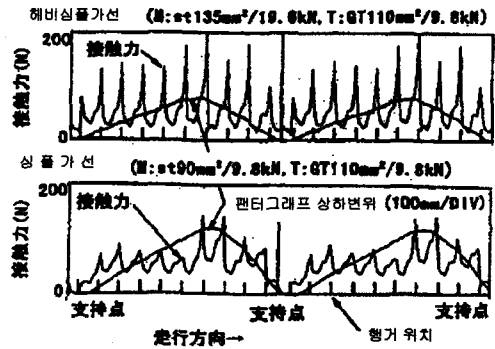


Fig 6 Effects of reflection coefficients on the variations of contact forces

3.2.4 팬터그래프 가진 주파수

팬터그래프는 전차선로를 지나가면서 행거 사이의 거리 및 경간 길이를 주기로 진동을 하게 된다. 경부고속철도 전차선로를 350 km/h로 주행하게 되는 경우의 행거 통과 주파수(Hanger passing frequency)와 경간 통과 주파수(Span passing frequency)는 다음과 같다.

Table 2 Pantograph excitation frequencies

구분	주파수	비고
행거 통과 주파수	14.4 혹은 21.6Hz	
경간 통과 주파수	1.54~2.4Hz (경간 63~40.5m)	

3.3 팬터그래프 측면에서의 영향

3.3.1 팬터그래프의 기계적 임피던스

팬터그래프의 동적 모델을 Fig 3과 같이 두고 운동 방정식을 유도한 후 팬터그래프의 헤드에 작용하는 접촉력과 진동속도와의 비 즉 기계적 임피던스, Z_p 를 구해 보면 식 (7) 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$Z_p = i\omega_p m_1 + D_1 + \frac{k_1}{i\omega_p} - \frac{(\frac{k_1}{i\omega_p} + D_1)^2}{i\omega_p m_2 + D_1 + D_2 + \frac{(k_1 + k_2)}{i\omega_p} - \frac{(\frac{k_2}{i\omega_p} + D_2)^2}{i\omega_p m_3 + D_2 + D_3 + \frac{k_2}{i\omega_p}} \quad (7)$$

추종 진폭은 변위/힘의 차원을 가지므로 식 (8) 과 같이 변환하여 기계 임피던스로부터 추종 진폭(Receptance)을 얻을 수 있다.

$$\frac{X}{F} = \frac{1}{Z_p * i\omega_p} \quad (8)$$

Fig 7에는 식(8)을 사용해 추종 진폭을 그린 것과 실제로 추종 진폭을 측정한 결과가 비교되어 있다.

시험 방법은 팬터그래프에 특정 주파수의 가진 변위를 팬터그래프에 증가시켜가면서 줄 때 이선이 비로소 처음 발생하는 변위를 기록하는 것이다.

Fig 7에서 볼 수 있는 바와 같이 추종 진폭은 3원계 모델의 주요 특성인 2개의 피크를 가지고 있고, 해석적 결과와 시험적 결과가 대체로 일치하고 있다. 이는 팬터그래프가 3원계의 질량-스프링-댐퍼의 동적 모델로 표시할 수 있다는 것을 의미한다. 처음 피크의 주파수는 해석적 결과와 시험적 결과가 일치하고 피크의 모양도 거의 일치한다. 8Hz 근방에 있는 피크는 해석에서는 분명한 산봉우리 모양을 보이나 시험 결과에서는 그렇지 못하다. 하지만 2번째 피크 이후의 추종 진폭은 거의 일치하고 있다.

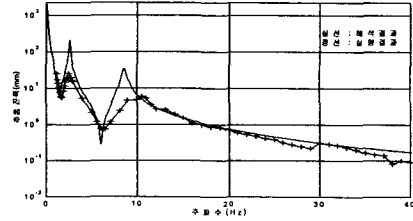


Fig 7 Pantograph follow-up displacements
($m_1=5.5kg, m_2=8kg, m_3=20kg, k_1=9000, k_2=2200, D_1=10 \text{ Ns/m}, D_3=40 \text{ Ns/m}$)

4. 팬터그래프 동적 설계 변수 최적화

4.1 설계 변수와 추종 진폭의 관계

Fig 3에 나와 있는 3원계 동적 모델의 팬터그래프가 갖는 추종 진폭의 특징은 Fig 8에 나와 있다.

행거 통과 주파수와 같은 고주파 영역에서는 추종성을 높이기 위해서 팬헤드의 질량(m_1)을 줄이거나 팬헤드 지지 스프링의 강성(k_1)을 높여야 함을 알 수 있다. 팬헤드의 질량을 줄이게 되면 모든 고주파 영역에서 추종 특성이 개선되는 반면에 팬헤드 지지 스프링의 강성을 높이면 피크 발생 주파수 근방에서만 추종 특성이 개선되는 특성을 보인다. 팬헤드 지지 스프링의 강성(k_1)을 지나치게 증가시키면 중요한 운전 속도 영역에 Anti-resonance 주파수가 위치할 수 있으므로 주의해야 한다. 한편, 경간 통과 주파수와 같은 저주파 영역에서 피크가 발생하는 주파수를 높이기 위해서는 스프링 k_2 의 강성을 높여야 하나 스프링 k_2 의 강성을 높이면 추종 진폭이 낮아진다.

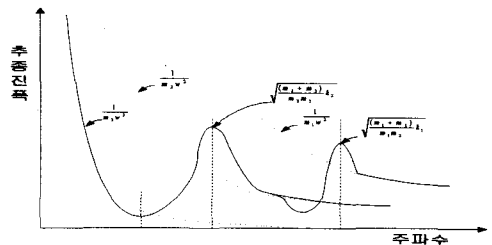


Fig 8 Follow-up displacements of a pantograph with 3 levels of masses

4.2 팬터그래프 동적 설계 변수 선정

팬터그래프의 질량을 줄이고 감쇠계수를 크게

하면 추종 특성이 향상될 것이므로 설계자가 가능한 한 좋은 값을 선택하려고 할 것이므로 이들을 최적화 대상에서 제외하였다.

최적화 대상으로는 스프링상수 k_1 과 k_2 로 하였다. 스프링상수 k_1 과 k_2 의 범위는 GPU 팬터그래프가 갖는 값, 행거 통과 주파수, G7 팬터그래프 시작점이 갖는 값 등을 참조로 Table 3과 같이 정하였다.

Table 3 Spring constants used for enhancing pantograph follow-up characteristics

구분	스프링상수(단위:N/m)
k_1	1200(GPU), 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200(G7)
k_2	9000(GPU), 19500, 30000(행거통과주파수)

스프링상수를 상기와 같이 변화시켰을 때의 경간 통과 주파수 주기 운동 및 행거 통과 주파수 주기 운동에 대한 추종 특성이 Fig 9, 10에 나와 있다.

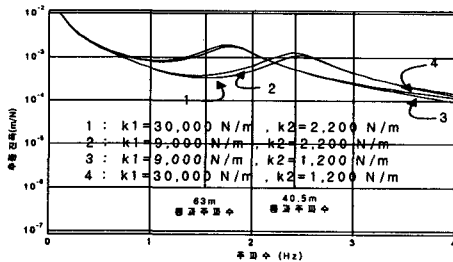


Fig 9 Follow-up displacements of a pantograph to the span-passing frequencies

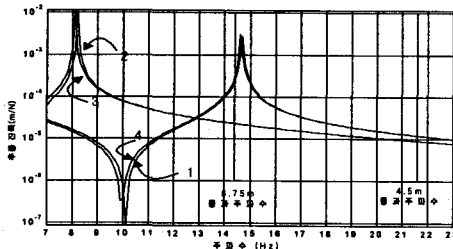


Fig 10 Follow-up displacements of a pantograph to the hanger-passing frequencies

4.3 동적 추종 성능 시뮬레이션 결과

동적 추종 성능은 식(1), (2) 등에서 알 수 있는 바와 같이 단순히 팬터그래프만으로는 평가할

수 없고 전차선로와 함께 동적 해석을 해야만 평가가 가능하다. 본 연구에서는 경부고속철도 전차선로를 대상으로 경간 길이 63m와 40.5m를 대상으로 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 GASENDO 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 해보았다. 팬터그래프의 동적 성능은 이선과 직접 관련이 있는 통계적 최소 접촉력 즉 (평균 접촉력-3x접촉력의 표준편차)의 값과 최대 접촉력 등을 가지고 평가하였다.

시뮬레이션에 사용된 설계변수는 스프링상수 이외에도 $m_1=6.5\text{kg}$, $m_2=8\text{kg}$, $m_3=20\text{kg}$, $D_3=150\text{Ns/m}$ 로 설정하였다. 시뮬레이션 결과가 Fig 11~16에 나와 있다. 통계적 최소 접촉력은 클수록 이선이 발생되지 아니하므로 좋고, 최대 접촉력은 작을수록 안정적인 집전을 할 수 있어 좋다. 통계적 최소 접촉력은 $k_1=30000\text{ N/m}$, $k_2=1200\text{ N/m}$ 의 조합에서 가장 양호한 값을 보이는데 이는 경간 주기 운동 및 행거 주기 운동을 가장 잘 추종할 수 있는 조합임을 Fig9~10으로부터 확인할 수 있다.

따라서 팬터그래프의 추종 특성을 향상시키기 위해서는 경간 통과 주파수 및 행거 통과 주파수의 진동에 잘 추종할 수 있도록 팬터그래프의 스프링 상수를 정하는 것이 바람직하다.

그러나, 고속용 팬터그래프의 경우에는 설계변수를 정할 때에 동적 추종 성능 뿐만 아니라 공력 소음 등 여러 가지 인자를 고려해야 한다. 예를 들어 $k_2=1200\text{N/m}$ 로 할 경우에 스프링의 진동진폭이 커져서 Fig 2에 나와 있는 플런저의 크기가 커져 350 km/h로 주행하게 되면 큰 공력 소음을 유발할 수 있다. 또한, 고속열차는 한 가지 속도만으로 운행되는 것이 아니고 선로의 조건에 따라 여러 가지 속도로 달리게 된다. $k_1=30000\text{N/m}$ 의 경우 열차 속도가 최고 속도인 350 km/h에서는 우수한 추종 성능을 보이나 중간 속도에서는 추종 성능이 급속히 악화되므로 열차 운용에 지장을 초래할 수 있다. 이러한 점들을 감안하여 $k_1=16500\text{ N/m}$, $k_2=1600\text{ N/m}$ 의 조합을 우선적으로 선택하여 시뮬레이션 해 본 결과 역시 250 km/h 구간에서 통계적 최소접촉력에 문제가 있었다. 250 km/h 근방의 속도에서 추종성을 개선하기 위하여 k_1 를 줄일 필요가 있다. k_1 을 줄여 가면서 여러 차례의 시뮬레이션을 해 본 결과

200~300 km/h 속도 범위에서 문제가 없기 위해서는 $k_1=16500$ N/m, $k_2=1600$ N/m의 조합이 적절하리라 생각한다. 물론, 이와 같이 k_1 을 줄이게 되면 350 km/h에서의 통계적 최소접촉력 및 최대 접촉력은 약간 악화되게 된다. 이 때의 통계적 최소접촉력 및 최대 접촉력은 각각 33.5N, 334N 이고 접촉력 변화(11개의 경간)는 Fig 17과 같다.

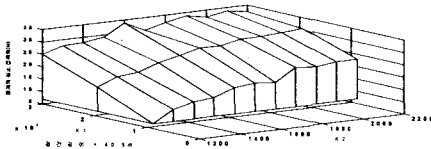


Fig 11 Statistical min. forces(span : 40.5m)

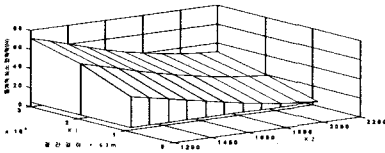


Fig 12 Statistical min. forces(span : 63m)

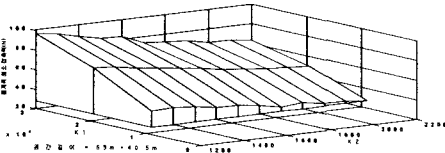


Fig 13 Statistical min. forces(span:40.5m+63m)

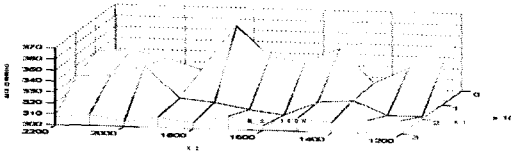


Fig 14 Max. forces(span : 40.5m)

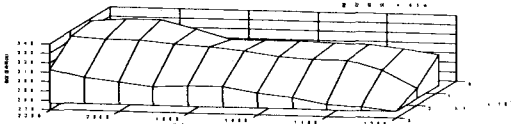


Fig 15 Max. forces(span : 63m)

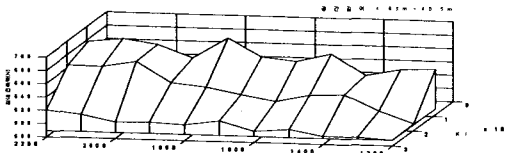


Fig 16 Max. forces(span : 63m + 40.5m)

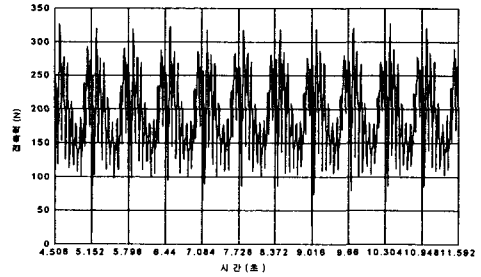


Fig 17 Simulation results of contact forces at 350 km/h

5. 결론

고속용 팬터그래프의 추종 특성은 3원계 모델로 예측이 가능하다는 것을 시험과 해석의 결과를 비교함으로써 확인하였다. 팬터그래프는 전차선로의 행거 및 경간의 주기로 진동을 하게 되므로 팬터그래프의 추종 특성을 향상시키기 위해서는 추종 진폭의 피크가 행거 및 경간 통과 주파수에서 발생하도록 스프링 상수를 결정하는 것이 바람직하다. 그러나 고속 팬터그래프는 추종 성능 뿐만 아니라 공력 소음도 고려해야 하며, 고속의 여러 속도에서 주행하게 되므로 최고 속도에서만 성능을 최적화하면 열차 운용에 문제가 있을 수 있으므로 이들을 종합적으로 고려하여 G7 팬터그래프의 설계변수(안)을 선정하였다.

후기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동 주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되고 있는 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Mitsuo ABOSHI, 1998.7, "Influence of Wave Motion of Contact Wire on Contact force Fluctuation", RTRI Report Vol.12, No.7
- (2) 鐵道總合技術研究所, 1993, "電車線 と 팬터그래프의 特性"