

전기철도용 팬터그래프의 추종성능 향상에 관한 연구

Improvement of the Current Collection Peformance of the Pantograph for the Electric Locomotive

**조용현¹, 이기원²

*#Yong Hyeon Cho(yhcho@krii.re.kr)¹, Kiwon Lee(kenlee@krii.re.kr)²

¹ 한국철도기술연구원, ² 한국철도기술연구원

Key words : Pantograph, Catenary, Current collection

1. 서론

집전성능의 확보를 위하여 전기철도용 팬터그래프의 집전성능을 향상시키기 위한 연구가 수행된 바 있다[1, 2]. 참고문헌 [1, 2]에서는 가선시스템을 시변 스프링으로 간주하여 설계변수를 일정 비율로 변화시켰을 때 어떤 설계변수가 집전성능에 영향을 많이 주는가를 연구하였다. 그러나 설계변수마다 변화 비율이 다르므로 참고문헌[1, 2]를 팬터그래프를 설계하는 데에 직접적으로 활용하는 데에는 제한이 있다.

전차선이 요동을 칠 때 팬터그래프가 전차선과 접촉을 유지할 수 있는 진폭 즉 팬터그래프의 추종진폭을 평가하면 설계변수의 변화에 따른 팬터그래프의 집전성능의 영향을 쉽게 파악할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 팬터그래프의 추종진폭에 관한 수식을 유도하고, 같은 속성을 갖는 설계변수, 예를 들어 질량, 스프링, 댐퍼 등으로 나누어서 실제로 가능한 설계변수의 변동 범위를 고려하여 팬터그래프와 전차선로의 동력학적 시뮬레이션을 사용하여 팬터그래프 설계변수의 변화가 집전성능에 미치는 영향을 분석해 보았다.

2. 팬터그래프 동적 모델과 추종진폭

싱글암 형식의 팬터그래프는 대체로 3 수준의 질량, 스프링, 댐퍼로 수학적 모델을 만들 수 있다. Fig. 1에는 한국형 틸팅열차에 탑재되는 팬터그래프의 형상과 수학적 모델이 제시되어 있다. 팬터그래프의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_j & 0 & 0 \\ 0 & m_m & 0 \\ 0 & 0 & m_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_j \\ \ddot{y}_m \\ \ddot{y}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_j + c_m & -c_m & 0 \\ -c_m & c_u + c_m & -c_u \\ 0 & -c_u & c_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_j \\ \dot{y}_m \\ \dot{y}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_j + k_m & -k_m & 0 \\ -k_m & k_u + k_m & -k_u \\ 0 & -k_u & k_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_j \\ y_m \\ y_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_0 + k_j x_{roof} \\ f_{aero} \\ -f_{contact} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

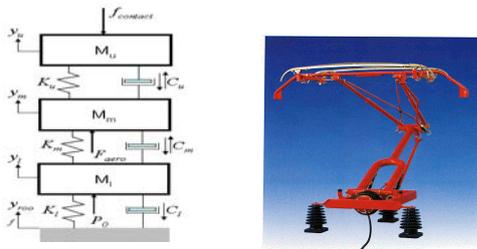


Fig. 1 Mathematical model for the pantograph on the tilting train

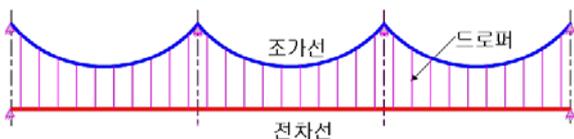


Fig. 2 Simple catenary type of catenary system

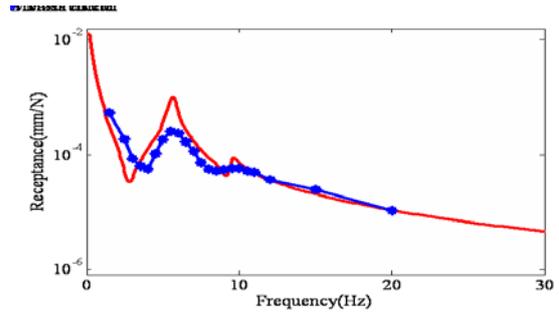


Fig. 3 Receptance of the pantograph on the tilting train : Comparison of analysis results(red) with measured ones(blue)

팬터그래프가 전류를 받는 가선시스템의 개략도가 Fig. 2에 나와 있다. 전류를 공급하는 전차선은 조가선에 드로퍼에 의하여 지지되고 있다.

팬터그래프 집전판에 힘을 가할 때 집전판이 가진기와 떨어지지 않고 최대로 움직일 수 있는 변위를 추종진폭이라고 한다. 추종진폭은 식 (1)로부터 틸팅열차 팬터그래프의 추종진폭을 구한 결과가 Fig. 3에 나와 있다. 빨간색 선은 추종진폭 해석결과이고 파란색 선은 추종진폭 시험결과이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 해석결과와 시험결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 이는 팬터그래프의 운동방정식을 식 (1)과 같이 3 수준의 이산모델로 나타내는 것이 타당하다는 것을 보여 준다. 또한 Fig. 3은 팬터그래프의 추종진폭은 주파수의 함수라는 것을 보여 주고 있다. 경간 통과 혹은 드로퍼 통과에 의한 가진 주파수에서 팬터그래프의 추종진폭이 크면 양호한 집전성능을 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌[1, 2]에서 경간길이가 주요 팬터그래프 설계변수라고 하였는데 경간길이가 집전성능에 영향을 미치는 이유는 경간 통과 주파수의 변화로 인한 추종진폭의 변화에 기인한다. 틸팅 팬터그래프의 경우 경간 길이가 곡선부에서는 직선부에 비하여 경간이 짧으므로 경간 통과 주파수의 증가에 따른 추종진폭의 악화로 인하여 집전성능이 나빠지게 된다.

3. 팬터그래프-가선시스템 동력학적 시뮬레이션

동력학적 시뮬레이션을 위한 가선시스템의 기본모델은 호남선 전차선로이다. 장력은 전차선 및 조가선에 각각 1.2톤이 작용하고 전차선과 조가선의 선밀도는 각각 0.987 kg/m와 0.605 kg/m이다. 팬터그래프 기본 모델로 아래의 특성을 갖는 틸팅열차 팬터그래프를 사용하였다. 열차의 운행속도는 180 km/h이다.

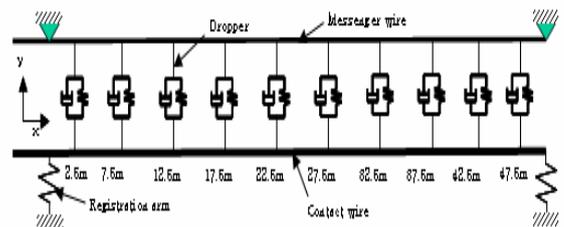


Fig. 4 Mathematical model for the catenary system of Honam line

Table 1 Baseline model for the pantograph

Design parameter	Value	Remark	Design parameter	Value	Remark
m_u	6.4 kg	Pan-head mass	m_l	10.15 kg	
c_u	0 Ns/m		c_l	60 Ns/m	
k_u	7200 N/m		k_l	80 N/m	
m_m	11.5 kg		F_{aero}	$0.00097 * speed^2$	speed km/h
c_m	0 Ns/m		P_0	70 N	
k_m	16500 N/m				

4. 팬터그래프 설계파라미터 영향분석

본 연구에서 고려한 설계파라미터는 Fig. 1에 나와 있는 변수들 중 질량(m_u, m_m, m_l), 감쇠계수(c_m, c_l), 스프링상수(k_u, k_m), 정적압상력(P_0)과 경간이다.

4.1 질량

질량 m_u, m_m, m_l 영향을 살펴보기 위하여 20% 씩의 질량 감소를 시켰을 때의 접촉력 변화가 Table 2에 나와 있다. Table에서 볼 수 있는 바와 같이 질량의 변화는 접촉력의 변화에 큰 차이는 없지만 질량 중에서 m_m 이 상대적으로 가장 큰 영향을 준다.

Table 2 Variation of the contact forces due to the change of the masses

Mass	Standard deviation	Statistical minimum
m_u, m_m, m_l	43.6 N	-31.2 N
$0.8m_u, m_m, m_l$	43.0 N	-31.0 N
$m_u, 0.8m_m, m_l$	41.7 N	-31.0N
$m_u, m_m, 0.8m_l$	43.3 N	-30.0N

4.2 감쇠계수

Table 3는 c_l 이 c_m 보다 큰 집전성능에 영향을 크게 미치는 것을 보여 주고 있다. c_l 의 감쇠계수가 커지면 접촉력의 표준편차를 대폭 줄이는 특성이 있으나 c_l 을 없애고 c_m 의 감쇠계수를 증가시키면 기본 모델보다 더 성능이 악화되는 특성을 보인다. 또한 c_l 의 감쇠계수의 변동은 질량의 변동에 비하여 지대하게 집전성능에 영향을 주고 있음에 주목할 필요가 있다.

Table 3 Variation of the contact forces due to the change of the upper and the middle mass

Damper	Standard deviation	Statistical minimum
$c_l = 60$ Ns/m	43.6 N	-31.2 N
$c_l = 140$ Ns/m	30.5 N	11.4 N
$c_m = 140$ Ns/m	59.5 N	-82.8 N

4.3 스프링상수

Table 4는 k_u 가 k_m 보다 집전성능에 상대적으로 더 큰 영향을 크게 미치는 것을 보여 주고 있다. 참고문헌 [1]에 따르면 k_m 의 영향이 스프링 중에서 가장 크다고 한다. 이러한 차이는 각 연구에서 사용하는 팬터그래프의 기본 모델이 다르기 때문이라고 생각한다.

Table 4 Variation of the contact forces due to the change of the spring constants

Spring	Standard deviation	Statistical minimum
$0.8k_u, k_m$	38.7 N	-17.0 N
$k_u, 0.8k_m$	42.7 N	-29.0 N
k_u, k_m	43.6 N	-31.2 N

4.4 압상력

Table 5는 압상력이 적당히 크면 통계적 최소 접촉력은 0 이상 이 되어 이선을 막을 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 압상량이 과다하면 최대 접촉력이 기준을 초과할 수 있으므로 지나친 압상력의 증가는 허용될 수 없다. 통계적 최소 접촉력이 0 이상 되고 최대 압상력을 기준 이하로 할 수 있도록 압상력을 제어한다면 집전성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5 Variation of the contact forces due to the change of the uplift force

Uplift force	Standard deviation	Statistical minimum
170 N	39.2 N	56.3 N
210 N	38.4 N	95.4 N
60 N	43.6 N	-31.2 N

4.5 경간

호남선의 표준 경간은 50 m이다. 경간 50 m일 때가 경간 40 m일 때보다 양호한 집전성능을 보인다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 경간 50 m일 때의 경간 통과 주파수에서 추종진폭이 경간 40 m일 때보다 크기 때문이라고 생각된다.

Table 6 Variation of the contact forces due to the change of the span

Span	Standard deviation	Statistical minimum
40 m_l	61.9 N	-68.4 N
50 m_l	43.0 N	-29.1 N

5. 결론

팬터그래프의 설계 변수별로 집전성능에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 질량 : 2수준의 질량 즉 m_m 의 영향이 상대적으로 가장 컸다.
- 감쇠계수 : 3수준의 댐퍼 즉 c_l 의 영향이 가장 컸다. c_l 의 크기는 집전성능 확보에 매우 중요하다. 가선시스템은 경감쇠 시스템이므로 팬터그래프의 감쇠계수가 집전성능에 미치는 영향이 매우 크다.
- 스프링상수 : 1수준의 스프링 즉 k_u 의 영향이 상대적으로 가장 컸으나 스프링상수를 20% 변화시킨다고 해도 집전성능에 큰 변화를 주지 못했다. 참고문헌[1]에서는 2수준의 스프링 즉 k_m 의 영향이 가장 큰 것으로 보고 하고 있다. 결과의 차이는 기준모델의 차이에서 비롯되는 것으로 판단된다.
- 압상력 : 압상력이 적당히 크면 접촉력 표준편차는 크게 줄지 않으나 통계적 최소 접촉력은 0 이상이 됨을 보여주고 있다. 그러나 압상량이 과다하면 최대 접촉력이 기준을 초과할 수 있으므로 지나친 압상력의 증가는 허용될 수 없다.
- 경간 : 경간 50 m일 때가 경간 40 m일 때보다 양호한 집전성능을 보인다. 경간 50 m일 때의 경간 통과 주파수에서 추종진폭이 경간 40 m일 때보다 크기 때문이라고 생각된다.

참고문헌

1. Tong-Jin Parka, Chang-Soo Hanb., Jin-Hee Jang, "Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle", Journal of sound and vibration, 266, 235-260, 2003
2. Jin-Woo Kima., Ho-Chol Chaeb, Bum-Seok Parkc, Seung-Yeol Leed, Chang-Soo Hand, Jin-Hee Jang, "State sensitivity analysis of the pantograph system for ahigh-speed rail vehicle considering span length and static uplift force", Journal of sound and vibration, 303, 405-427, 2007