

터널구간 가선계의 집전성능 Current Collection Performance of Catenary System within Tunnel Section

손건호*, 이승일**, 최연선***
Gun-Ho Son, Seung-Il Lee, Yeon-Sun Choi

ABSTRACT

A dynamic simulation program of a catenary-pantograph system including tunnel section and transient section is developed in this study. The simulation program can accommodate for the pantograph of two panheads and three d.o.f model. Using the developed program, the dynamic characteristics with a SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH is analyzed at the conventional TAEBAEK line and its tunnel section when the catenary system is supported by a tunnel bracket. The simulation results show that the variation of contact force and uplift displacement is allowable in general section and the entrance and exit of a tunnel, but the uplift displacement and the separation ratio within tunnel section is difficult to allow.

1. 서론

기존선 전철구간에는 다수의 터널이 존재한다. 터널구간에서의 가선은 일반구간보다 전차선 높이가 낮으므로 적절한 집전성능을 유지하기 위해 경간길이, 드로퍼 수, 장력이 일반구간의 가선계와 다르게 설계된다. 따라서 기존선 고속화를 이루기 위해서는 터널구간 집전성능에 대한 재검토가 필요하다. 전기철도 차량이 주행 중 판토품라프가 전차선과 떨어지는 이선이 발생하게 되면 일시적인 전력공급중단으로 전기철도의 속도향상과 안정주행이 어렵게 되므로 기존선 구간에서 전기철도 차량의 속도향상을 위해서는 가선계와 판토품라프의 동특성 해석 결과를 바탕으로 판토품라프를 개량하고 가선계의 설계변수를 적절하게 조절해야 한다.

가선계의 동적해석과 관련하여 Manabe⁽¹⁾는 Euler 알고리즘을 이용하여 가선계를 모델링하여 2자유도 계 판토품라프를 시뮬레이션하여 이선율, 평균압상량, 판토품라프 고저차 등을 계산하였다. 최연선⁽²⁾은 중앙차분법을 이용한 가선계 집전성능 해석 프로그램을 개발하고 이를 경부고속전철 가선계에 적용하였다. 조용현⁽³⁾은 경부고속철도에서 터널주행 시 발생하는 공기역학이 집전성능에 미치는 영향을 검토하였다. 권삼영⁽⁴⁾은 기존 터널구간에서 터널브래킷으로 지지하는 가선계에 대하여 최고 운행 가능 속도를 계산하였다. 본 연구에서는 기존의 가선계 해석용 중앙차분법(central difference method) 프로그램을 확대 개선하여 태백선 전철화 구간에서 SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH가 터널구간을 주행할 때 집전성능을 해석 하였다.

*1 학생회원, 성균관대학교 대학원 석사과정

*2 정회원, 한국철도대학 차량기계과

*3 정회원, 성균관대학교 기계공학부, 교수

2. 집전시스템 해석모델

태백선 전철화 구간에 사용하는 가선계는 단순가선계(simple catenary system)이고 SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH가 장착될 예정이다. 가선계는 조가선(messenger wire), 전차선(contact wire), 드로퍼(dropper), 장력 조절장치, 가동브래킷 등으로 구성된다. 조가선은 지지부에서 수직방향으로 구속되어 있고, 전차선과 조가선은 일정 장력을 받는다.

2.1 가선계 모델

전차선을 집중질량계로 모델링 한 Fig. 1에서 i 질점에 스프링력($F_{s,i}$), 감쇠력($F_{d,i}$), 판토히크로부터 접촉력($F_{p,i}$)이 작용한다면 아래의 운동방정식이 성립한다.⁽²⁾

$$m_i \ddot{x}_i(t) = F_{s,i} + F_{d,i} + F_{p,i} \quad (1)$$

각 질점의 상하변위만 가정하면, 이웃 질점과 변위차가 있는 경우 장력 T로 인한 복원력 즉, 질점 i 에 발생하는 스프링력은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$F_{s,i} = - \sum_l \frac{T}{d} \{ 2x_i(t) - x_{i+1}(t) - x_{i-1}(t) \} \quad (2)$$

여기서 d 는 질점 사이의 거리이다. 질점 i 에 작용하는 감쇠력은 i 질점과 이웃 질점의 속도에 결정되며 식 (3)으로 표현된다.

$$F_{d,i} = - \sum_l C_l \{ 2\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i-1}(t) \} \quad (3)$$

중앙차분법을 이용하면 $\ddot{x}(t)$ 를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{\Delta t^2} \{ x(t+\Delta t) - 2x(t) + x(t-\Delta t) \} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 식 (5)와 같이 수치적분이 가능한 식이 계산된다. 여기서 식 (3)의 감쇠력을 계산하기 위해 속도항을 중앙차분법으로 사용하게 되면 $x(t+\Delta t)$ 항이 연성(couple)되어 계산이 복잡하게 된다.

$$x_i(t+\Delta t) = 2x_i(t) - x_i(t-\Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} \{ F_{s,i} + F_{d,i} + F_{p,i} \} \quad (5)$$

속도항을 식 (6)과 같이 계산을 간편하게 하기 위하여 Euler알고리즘을 적용하였다.

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{2\Delta t} \{ x(t+\Delta t) - x(t-\Delta t) \} \quad (6)$$

여기서 $F_{p,i}$ 는 i 질점에 미치는 접촉력으로 판토히크가 Fig. 1에서와 같이 질점 사이에 있을 때 각 질점에 작용하는 접촉력은 선형보간법(linear interpolation)을 이용하면 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{p,i} = \alpha P_m(t) \quad , \quad F_{p,i+1} = \beta P_m(t) \quad , \quad F_{p,j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, i-1, i+2, \dots, n) \quad (7)$$

여기서, $P_m(t)$ 는 판토히크와 가선계의 접촉력이고 $\alpha = \frac{b}{d}$, $\beta = \frac{a}{d}$ 이다.

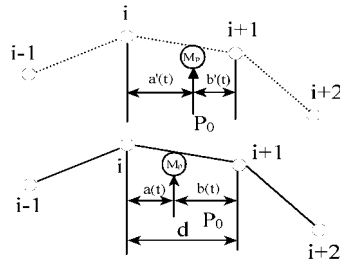


Fig. 1 Distribution of contact force

2.2 가선계 설계제원

Table 1은 기존 태백선 구간 가선계에 대한 설계제원이다. 태백선 일반구간은 50 m와 30 m 경간길이에 설치되어있고, 터널구간의 경간길이는 20 m이다. 일반구간과 터널구간의 경간 사이 드로퍼 간격은 5 m이고 초기 및 끝단은 각각 2.5 m이다.

Table 1 Catenary specification of Taebaek line

	Contact wire	Messenger wire
장 력	9810 N	9810 N
단 면 적	Cu 110 mm ²	Cdcu 70 mm ²
선 밀 도	0.987 kg/m	0.597 kg/m
드로퍼 수 (경간길이)	10개(50 m), 6개(30 m), 4개(20 m)	

태백선 터널구간은 공간이 협소하여 Fig. 2와 같이 전차선과 조가선이 터널브래킷(tunnel bracket)에 같이 지지되어있다. 터널브래킷은 전차선을 지지하는 역할과 함께 판토히그라프 주행에 따른 진동을 흡수하기 위해 유연성을 가지도록 설계되어있다. 그러나 브래킷의 질량이 무거워 관성력이 크거나 전차선과 연결부위의 감쇠가 작으면 집전 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.⁽⁴⁾ 터널 브래킷의 설계변수는 Table 2와 같다.

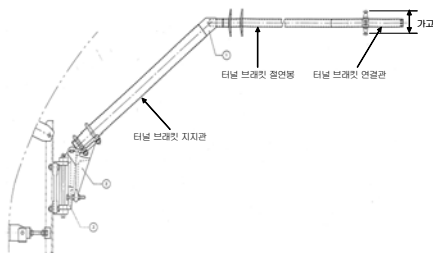


Fig. 2 Tunnel bracket

Table 2 Parameters of the tunnel bracket

	Parameter
Mass	4.9 kg
Stiffness	2500 N/m
Damping ratio	0.00151

2.3 판토히그라프 모델링

태백선 전철화 구간에 장착하게 될 판토히그라프는 SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH로서 Fig. 3과 같이 모델링 될 수 있다.

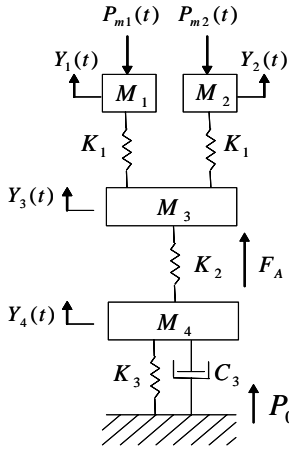


Fig. 3 Model of the pantograph

Table 3 Parameters of the pantograph

Parameters	Value
M ₁	2.88 kg
M ₂	2.88 kg
M ₃	10.45 kg
M ₄	10.15 kg
K ₁	4600 N/m
K ₂	13500 N/m
K ₃	80 N/m
C ₃	60 Ns/m
F _A	0.0135*V ²
P ₀	70 N

SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH는 Fig. 3과 같이 집전판이 2개이고 집전판 사이의 거리는 597 mm이다. 앞뒤 집전판에 작용하는 접촉력은 각각 $P_{m1}(t)$ 와 $P_{m2}(t)$ 이다. Table 3에서 F_A 는 양력(lift force)으로서 0.0135는 양력계수이고 V 는 차량의 속도이다. 가선계와 판토히그라프의 동적응답을 계산하기 위해서 중양차분법을 적용하면 시간 $t+\Delta t$ 에서 판토히그라프의 변위는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$Y(t+\Delta t) = \nu x_i(t+\Delta t) + \delta x_{i+1}(t+\Delta t) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \nu = \frac{b'}{d}, \quad \delta = \frac{\alpha'}{d}$$

그리고, 미지의 접촉력 $P_{m1}(t)$ 와 $P_{m2}(t)$ 는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$P_{m1}(t) = \frac{D_1 - \gamma D_2 - \delta D_3}{\left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{m}(\alpha\gamma + \beta\delta) \right\} \Delta t^2}, \quad P_{m2}(t) = \frac{D_4 - \gamma D_5 - \delta D_6}{\left\{ \frac{1}{M_2} + \frac{1}{m}(\alpha\gamma + \beta\delta) \right\} \Delta t^2} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D_1 &= 2Y_1(t) - Y_1(t - \Delta t) - \frac{\Delta t^2}{M_1} [K_1 \{Y_1(t) - Y_3(t)\}] & D_4 &= 2Y_2(t) - Y_2(t - \Delta t) - \frac{\Delta t^2}{M_2} [K_1 \{Y_2(t) - Y_3(t)\}] \\ D_2 &= 2x_i(t) - x_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i} + F_{d,i}] & D_5 &= 2x_i(t) - x_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i} + F_{d,i}] \\ D_3 &= 2x_{i+1}(t) - x_{i+1}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i+1} + F_{d,i+1}] & D_6 &= 2x_{i+1}(t) - x_{i+1}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i+1} + F_{d,i+1}] \end{aligned} \quad (10)$$

3. 수치해석 결과

시뮬레이션 속도는 100 km/h에서 180 km/h까지로 한정하였다. 양단고정인 경간 시작점과 끝점에서의 오차를 제거하기 위해 경간중앙에서의 해석 결과만을 취하였다. 터널 입출구간은 0.2/1000의 구배를 갖는다. 구배가 있는 구간에서의 판토히그라프 압상량은 구배에 의한 전차선의 수직변위 만큼 줄어든다. Fig. 4는 각 구간별 접촉력을 나타낸 결과이다. 접촉력은 앞 집전판과 뒤 집전판의 합이며 속도가 증가할수록 접촉력은 높아지는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 평균압상량을 구간과 속도별로 나타내었다. 터널 구간을 제외한 모든 구간에서 동일한 속도로 주행 시 전차선 평균압상량의 변화는 거의 차이가 없었다.

터널구간은 일반구간에 비해 경간길이가 짧기 때문에 평균압상량이 일반구간에 비해 아주 작았다. Fig. 6은 터널구간 주행 시 접촉력이 0이하인, 즉 $P_m(t) < 0$ 을 이선으로 보았을 경우와 전차선의 변위가 집전판의 변위보다 큰 경우, 즉 $\delta > 0$ 인 경우와 $\delta > 1$ 인 경우, $P_m(t) < 0$ 이고 $\delta > 0$ 인 경우에 대하여 각각 이선율을 속도별로 나타낸 결과이다. 또한 Fig. 7은 터널구간 180 km/h로 주행 시 전차선과 집전판의 변위차이인 δ 의 분포도를 나타낸 결과이다. Fig. 8에서 Fig. 11까지는 180 km/h에서 각 구간별로 앞 집전판과 뒤 집전판의 접촉력과 압상량을 나타낸 그림이다. 모든 구간에서 뒤 집전판의 압상량이 앞 집전판보다 약간 높았다. 접촉력은 경간 지지점 부근에서 최대가 되며, 전차선의 압상량은 경간 중심부에서 최대 변위가 발생하고, 곡선 당김 금구 주위에서 수직변화량이 작았다. 또한 앞 집전판의 영향으로 인하여 뒤 집전판의 압상량이 모든 속도에서 더 큰 결과를 얻었다. Fig. 12는 130 km/h로 주행 시 전차선 압상량이다. 전차선 압상량의 불규칙한 정도가 반복하게 되면 가선계에 무리한 영향을 미치게 되며 이는 사고로 연결될 수가 있다. 태백선 전차선 장력을 9810 N에서 경부고속철도 기존선 터널구간의 장력값인 14000 N으로 증가시키면 Fig. 13과 같이 압상량 변화가 작아지는 것을 알 수 있다.

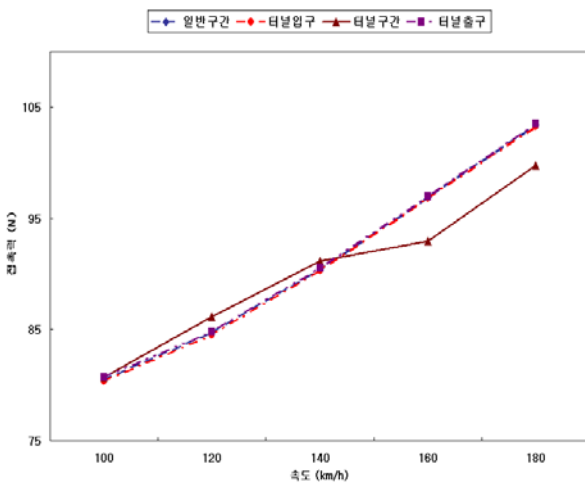


Fig. 4 Contact force at each section

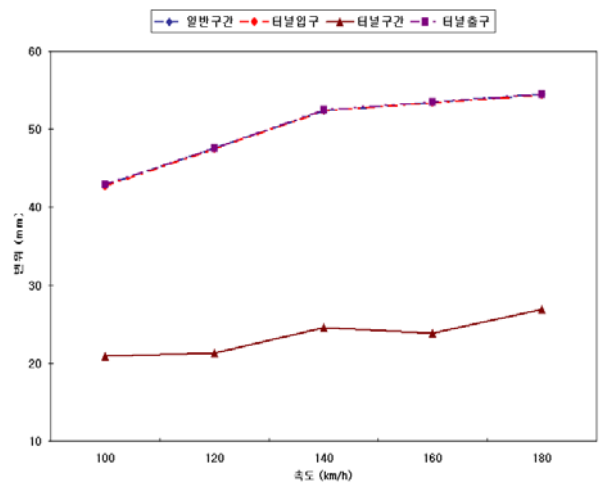


Fig. 5 Average uplift displacement

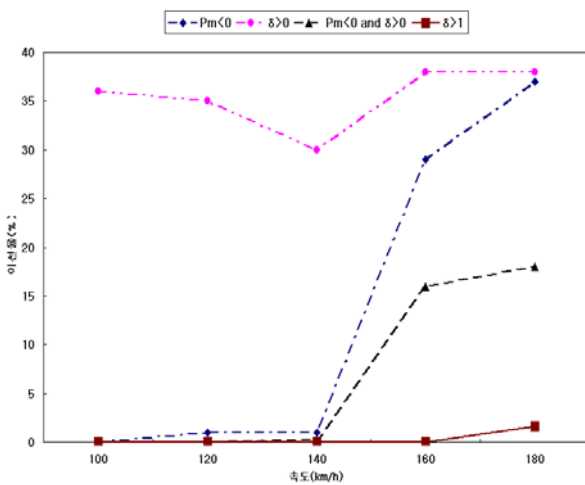


Fig. 6 Separation ratio within tunnel section

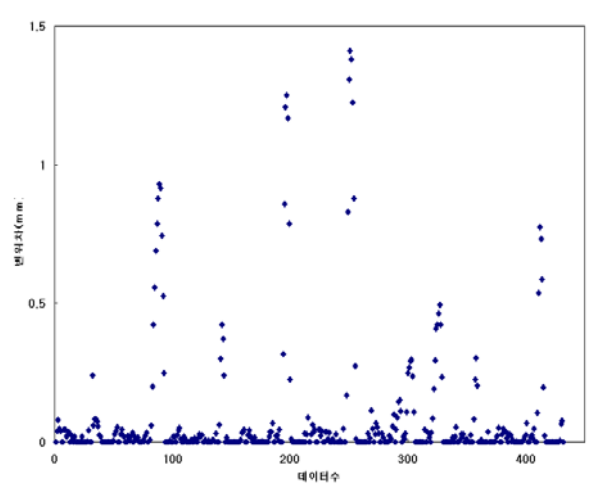
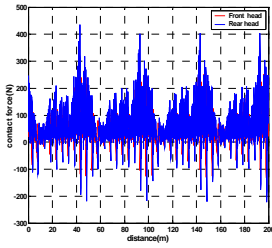
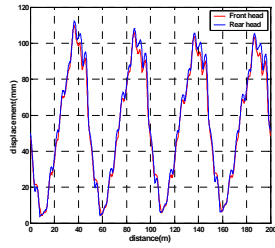


Fig. 7 Difference of uplift displacement(V=180 km/h)

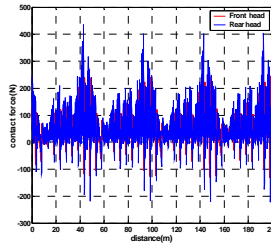


(a) Contact force

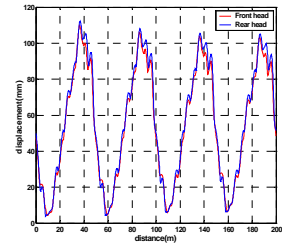


(b) Uplift displacement

Fig. 8 General section

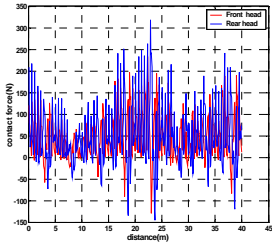


(a) Contact force

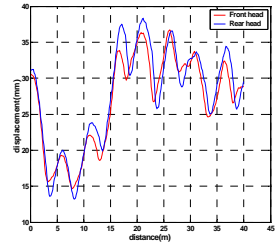


(b) Uplift displacement

Fig. 9 Entrance tunnel section

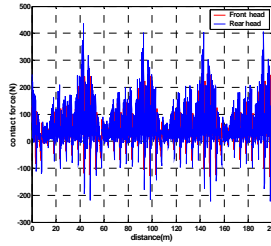


(a) Contact force

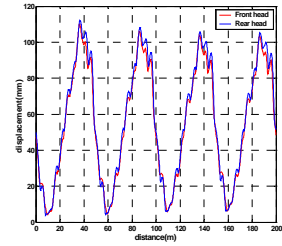


(b) Uplift displacement

Fig. 10 Tunnel section

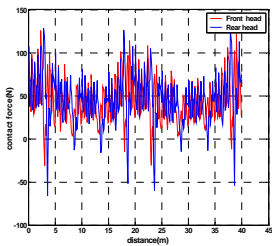


(a) Contact force

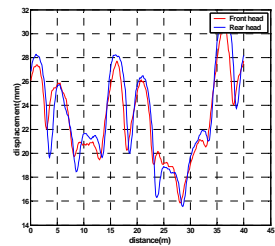


(b) Uplift displacement

Fig. 11 Exit tunnel section

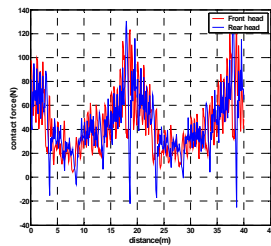


(a) Contact force

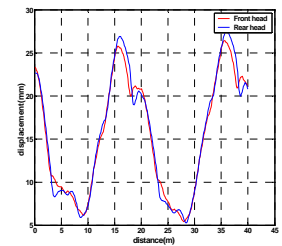


(b) Uplift displacement

Fig. 12 Tunnel section (Tension=9.81 KN)



(a) Contact force



(b) Uplift displacement

Fig. 13 Tunnel section (Tension=14 KN)

4. 결론

본 연구에서는 중앙차분법을 이용하여 집전판이 두 개인 3자유도 판토품라프가 일반구간과 터널구간을 주행할 때, 가선계의 동특성을 해석하는 프로그램을 개발하여 기존선 고속화가 추진 중 태백선에 적용, 판토품라프와 가선계의 성능을 계산하였다. 기존 태백선 전철에 장착되는 SCHUNK'S WBL 85-판토품라프는 일반구간에서 180 km/h까지는 이선현상이 나타나지 않았으나 터널구간에서는 이선현상이 나타났다. 태백선 터널 입출구간은 일반구간과는 유사하였다. 그러나 터널브래킷이 설치되어있는 터널구간에서는 일반구간에 비해 경간길이가 짧고, 일반구간 브래킷과는 다르므로 전차선과 판토품라프의 접촉으로 인한 진동이 조가선에 미치게 된다. 터널구간은 일반구간에 비해 압상량이 작고 130 km/h부터 압상량 변화가 커지는 것을 확인하였다. 따라서 경부고속철도 기존선 터널구간과 같이 전차선의 장력을 크게하면 압상량 변화 감소가 가능할 수 있다.

참고문헌

1. K. Manabe (1989), "High-Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System," JSME International Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 31-40
2. 정대현, 최연선 (1991). "고속전철 Catenary/Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석," 성균관대학교 과학기술연구소. 성대논문집(과학기술편), Vol. 42, No. 1 pp. 377-390
3. 조용현, 정홍채, 권혁빈 (1999), "터널로 진입하는 고속 전철에 의한 공력변화가 고속 가선계에 미치는 영향 분석(I)," 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 333-343
4. 권삼영, 이기원, 창상훈 (2000), M'hamed Matri, "터널 브래킷을 사용한 가선시스템의 최고속도 예측 및 검토," 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 628-635