

터널구간 가선계의 집전성능

Current Collection Performance of Catenary System within Tunnel Section

손건호¹ · 이승일² · 최연선³

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 are 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.

Keywords : Tunnel bracket(터널 브래킷), Separation ratio(이선율), Current collection performance(집전성능), TAEBAEK line(태백선)

1. 서론

기존선 전철구간에는 다수의 터널이 존재한다. 터널구간은 일반구간보다 전차선 높이가 낮으므로 적절한 집전성능을 유지하기 위해 경간 길이, 드로퍼 수, 장력이 일반구간의 가선계와 다르게 설계되어야 한다. 따라서 기존선 고속화를 이루기 위해서는 터널구간 집전성능에 대한 재검토가 필요하다. 전기철도 차량이 주행 중 판토티그래프가 전차선과 떨어지는 이선현상으로 인해 아크가 발생하여 전차선이 손상되면 전류가 비정상적으로 변동하기 때문에 전기철도의 속도향상과 안정주행이 어렵게 되므로 기존선 구간에서 전기철도 차량의 속도향상을 위해서는 가선계와 판토티그래프의 동특성 해석 결과를 바탕으로 판토티그래프를 개량하고 가선계의 설계변수를 적절하게 조절해야 한다. 가선계의 동적해석과 관련하여 Manabe[1]는 Euler 알고리즘을 이용하여 가선계를 모델링하여 2자유도계 판토티그래프를 시뮬레이션하여 이선율, 평균압상량, 판토티그래프 고저차 등을 계산하였다. 최연선[2]은 중앙차분법을 이용한

가선계 집전성능 해석 프로그램을 개발하고 이를 경부고속철도 가선계에 적용하였다. 조용현[3]은 경부고속철도에서 터널주행 시 발생하는 공기역학이 집전성능에 미치는 영향을 검토하였다. 권삼영[4]은 기존 터널구간에서 터널 브래킷(tunnel bracket)으로 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-판토티그래프가 터널구간을 주행할 때 집전성능을 해석하였다.

2. 집전계 해석모델

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

1 학생회원, 성균관대학교 대학원 석사과정
2 정회원, 한국철도대학 차량기계과
3 정회원, 성균관대학교 기계공학부, 교수

2.1 가선계 모델

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

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

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

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

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

$$F_{d,i} = - \sum_j C_j \{ 2 \dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i-1}(t) \} \tag{3}$$

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

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

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 $x_i(t + \Delta t)$ 항이 연성(couple)되어 계산이 복잡하게 된다.

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

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

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

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

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

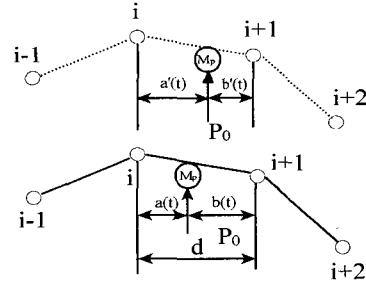


Fig. 1. Distribution of contact force

여기서, $P_m(t)$ 는 판토히라프와 가선계의 접촉력이고

$$\alpha = \frac{b(t)}{d}, \quad \beta = \frac{a(t)}{d} \text{ 이다.}$$

2.2 가선계 설계제원

Table 1은 기존 태백선 구간 가선계에 대한 설계제원이 다. 태백선 일반구간은 50m 경간 길이로 설치되어 있고, 터널구간의 경간 길이는 20m이다. 일반구간과 터널구간의 경간 사이 드로퍼 간격은 5m이고, 초기 및 끝단은 각각 2.5m이다. 태백선 터널구간은 공간이 협소하여 Fig. 2와 같이 전차선과 조가선이 터널 브래킷(tunnel bracket)에 같이 지지되어 있다. 터널 브래킷은 전차선을 지지하는 역할과 함께 판토히라프 주행에 따른 진동을 흡수하기 위해 유연성을 가지도록 설계되어 있다. 그러나 브래킷의 질량이 무거워 관성력이 크거나 전차선과 연결부위의 감쇠가 작으면 집전 성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있다[4]. 터널 브래킷의 설계변수

Table 1. Catenary specification of Taebaek line

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

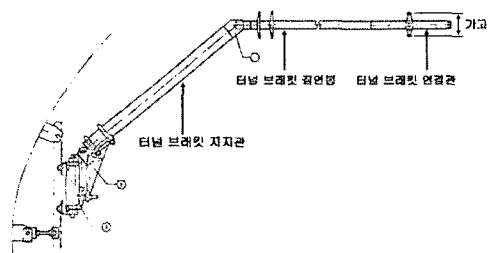


Fig. 2. Tunnel bracket

Table 2. Parameters of the tunnel bracket

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

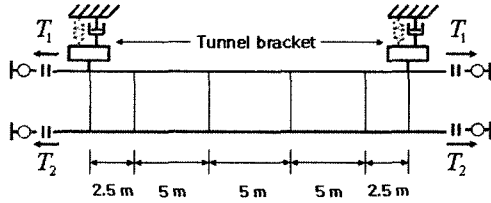


Fig. 3. Model of TAEBAEK tunnel section

는 Table 2와 같으며, Fig. 3은 터널구간의 가선계 동적 해석 모델로서 전차선과 조가선이 드로퍼에 의해 연결된 유한개의 질점으로 모델링하였다.

2.3 판토히라프 모델링

태백선 전철화 구간에 장착하게 될 판토히라프는 SC-HUNK'S WBL 85-판토히라프로써 Fig. 4와 같이 모델링 될 수 있다[6].

차량상부에 지지되어 있는 가대프레임 M4, 전차선에 일정한 압력으로 접촉하도록 하는 상승장치는 M3로서 양력 (lift force) FA의 영향을 받는다. 전차선으로부터 집전작용을 수행하는 두 개의 집전판 M1과 M2사이의 거리는 597 mm이다. 앞뒤 집전판에 작용하는 접촉력은 각각 Pm1(t)와 Pm2(t)이며, Table 3에서 0.0135는 양력계수이고 V[m/s]는

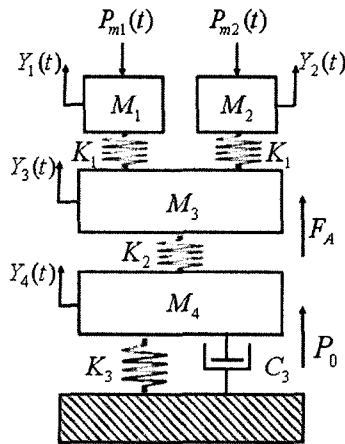


Fig. 4. Model of the pantograph

Table 3. Parameters of the pantograph

Parameters	Value
M1	2.88kg
M2	2.88kg
M3	10.45kg
M4	10.15kg
K1	4600N/m
K2	13500N/m
K3	80N/m
C3	60Ns/m
FA	0.0135*V ² N
P0	70N

차량의 속도이다. 가선계와 판토히라프의 동적응답을 계산하기 위해서 중앙차분법을 적용하면 시간 $t + \Delta t$ 에서 판토히라프의 변위는 식 (8)과 같이 계산된다.

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

여기서, $\gamma = \frac{b'(t)}{d}$, $\delta = \frac{a'(t)}{d}$

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

$$P_{m1}(t) = \frac{D_1 - \gamma D_2 - \delta D_3}{\left\{ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{m}(\alpha\gamma + \beta\delta) \right\} \Delta t^2}$$

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

여기서,

$$D_1 = 2Y_1(t) - Y_1(t - \Delta t) - \frac{\Delta t^2}{M_1} [K_1 \{ Y_1(t) - Y_3(t) \}]$$

$$D_2 = 2x_i(t) - x_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i} + F_{d,i}]$$

$$D_3 = 2x_{i+1}(t) - x_{i+1}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i+1} + F_{d,i+1}]$$

$$D_4 = 2Y_2(t) - Y_2(t - \Delta t) - \frac{\Delta t^2}{M_2} [K_1 \{ Y_2(t) - Y_3(t) \}]$$

$$D_5 = 2x_i(t) - x_i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i} + F_{d,i}]$$

$$D_6 = 2x_{i+1}(t) - x_{i+1}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{m} [F_{s,i+1} + F_{d,i+1}]$$

3. 수치해석 결과

시물레이션 속도는 일반구간은 100km/h에서 200km/h까지, 터널구간은 180km/h까지 수치해석하였다. 양단고정인 경간 시작점과 끝점에서의 오차를 제거하기 위해 경간 중앙에서의 해석 결과만을 취하였다. 접촉력은 앞 집전판과 뒤 집전판의 합이며 속도가 증가할수록 높아지는 것을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 5에서 일반구간과 터널구간의 평균 접촉력을 비교한 결과, 140km/h 이전의 속도에서는 터널구간의 평균 접촉력이 높지만, 그 이후의 속도에서는 일반구간의 평균 접촉력보다 떨어지는 결과를 볼 수 있었다. Fig. 6과 Fig. 7은 앞 집전판과 뒤 집전판의 평균 압상량을 속도별로 나타내었다. 터널구간은 일반구간에 비해 경간 길이가 짧기 때문에 평균 압상량이 일반구간에 비해 아주 작았다. 또한 Fig. 6과 Fig. 7을 비교한 결과 뒤 집전판이 앞 집전판보다 평균 압상량이 조금 더 높았다. 이는 앞 집전판과 전차선의 접촉으로 인한 파동현상이 뒤 집전판의 집전성능에 영향을 주기 때문이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 앞 집전판과 뒤 집전판의 일반구간에서의 이선율(separation ratio)을 나타내었고

Fig. 10과 Fig. 11에서 터널구간의 이선율을 나타내었다. 이 선현상을 어떠한 기준을 가지고 판단함에 따라 집전성능의 범위가 달라지며 이는 곧 전기철도의 최고속도를 예측함에 있어서 아주 중요한 부분이다. 그러므로 본 연구에서는 접촉력이 0 이하인, 즉 $P_m(t) \leq 0$ 을 이선으로 보았을 경우, 전차선의 변위가 집전판의 변위보다 큰 경우, 즉 $\delta > 0$ 인 경우와 또한, 그 변위차이가 1mm 이상 차이가 나는 $\delta \geq 1$ 인 경우, $P_m(t) \leq 0$ 이고 $\delta > 0$ 인 경우에 대하여 각각 이선율을 속도별로 나타내었다. 일본철도총합연구소(RTRI)의 범용 집전성능 해석 프로그램인 GASENDO[5]와 본 프로그램에 경부고속철도구간과 호남선 구간을 적용하여 비교한 결과, 본 프로그램에서는 전차선의 압상량과 판트그래프 압상량의 상대변위인 δ 가 1 이상인 즉, $\delta \geq 1$ 인 경우를 이선현상으로 보는것이 타당하였다. Fig. 8에서 Fig. 11까지의 해석결과 이선율 1% 이하를 만족하는 경우를 안정된 집전성능으로 평가한다면, 일반구간은 180km/h, 터널구간은 140km/h까지 주행 가능한 것으로 판단되었다. Fig. 5에서 터널구간의 접촉력이 일반구간의 접촉력보다 낮아지기 시작하는 속도가 140km/h 인 것을 보면 집전성능의 해석결과가 평균 접

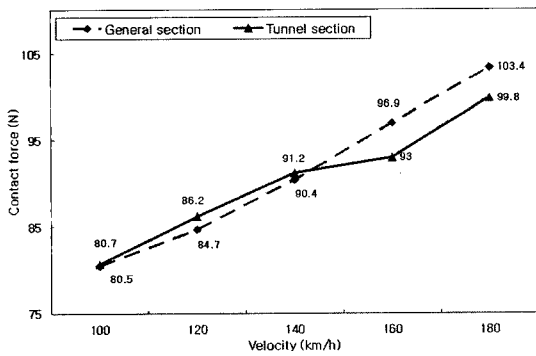


Fig. 5. Contact forces

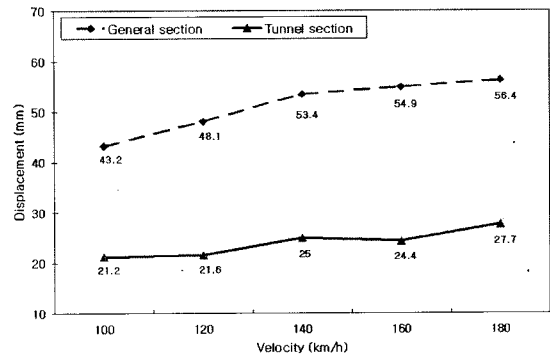


Fig. 7. Average uplift displacements of rear head

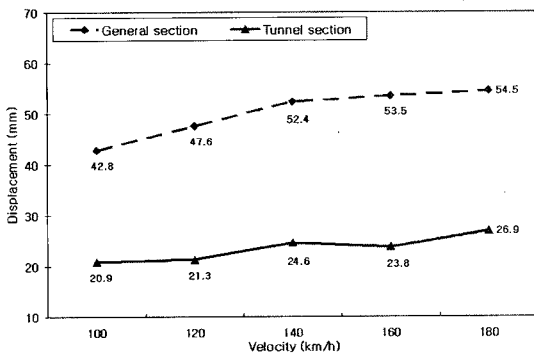


Fig. 6. Average uplift displacements of front head

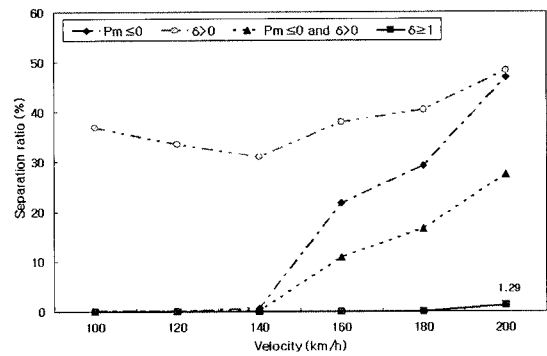


Fig. 8. Separation ratio of front head at general section

촉력의 경향을 정확히 반영함을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 일반구간에서의 최고 운행 가능속도인 180km/h에서의 접촉력과 압상량 변화를 나타내었다. 해석결과 경간 지지점에서 접촉력 저하현상이 있고, 수직변화량이 작았다. 또한 경간 중심부에서 최대 변위가 발생하였다. 앞 집전판의 영향으로 인하여 뒤 집전판의 압상량이 모든 속도에서 더 큰 변화가 나타남을 볼 수 있었다. Fig. 14와 Fig. 15는 터널구간에서의 최고 운행 가능속도인 140km/h

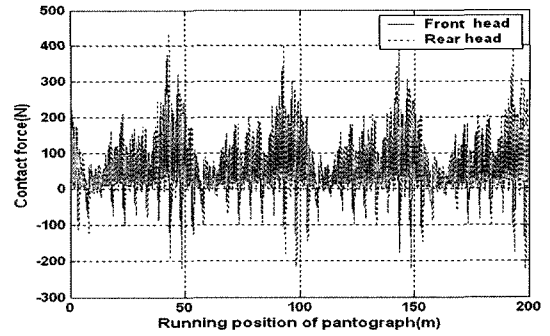


Fig. 12. Contact force of general section at 180 km/h

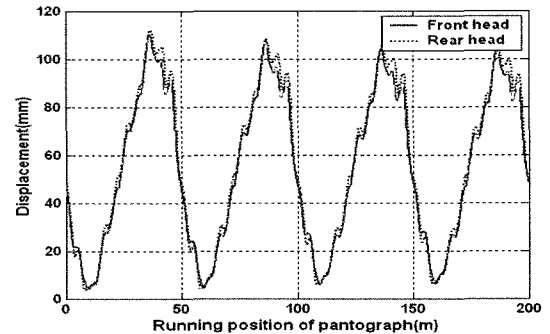


Fig. 13. Uplift displacement of general section at 180 km/h

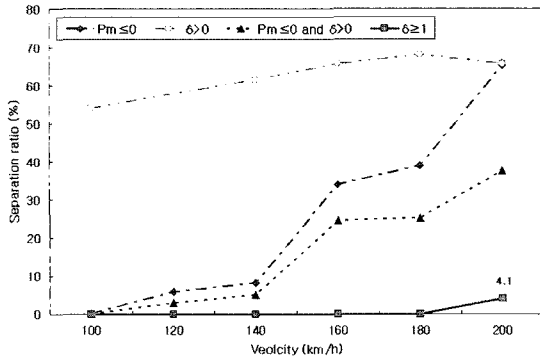


Fig. 9. Separation ratio of rear head at general section

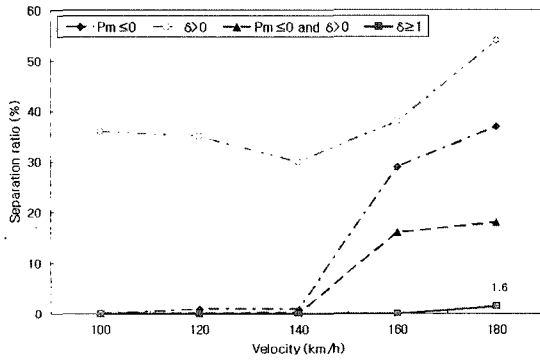


Fig. 10. Separation ratio of front head at tunnel section

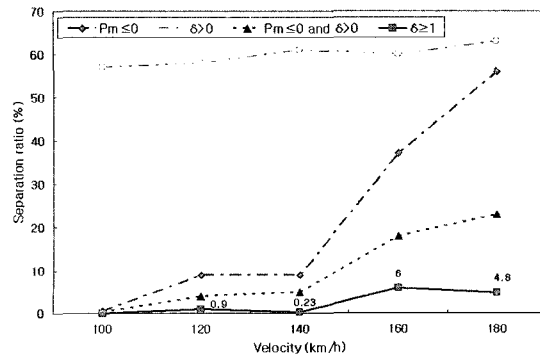


Fig. 11. Separation ratio of rear head at tunnel section

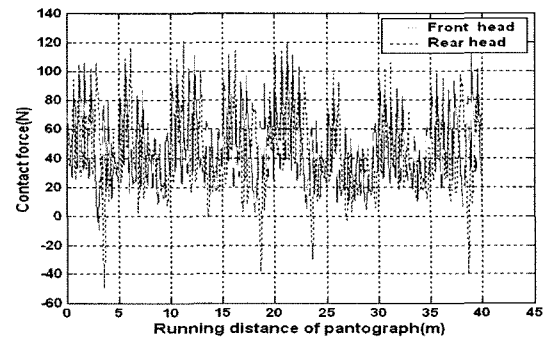


Fig. 14. Contact force of tunnel section at 140 km/h

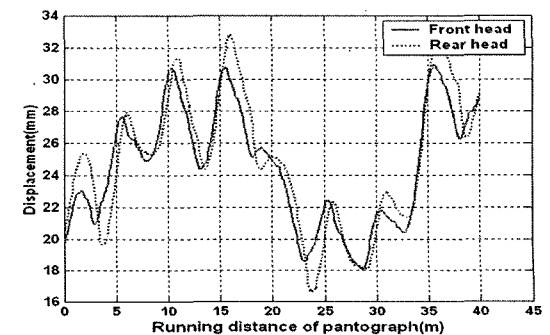


Fig. 15. Uplift displacement of tunnel section at 140 km/h

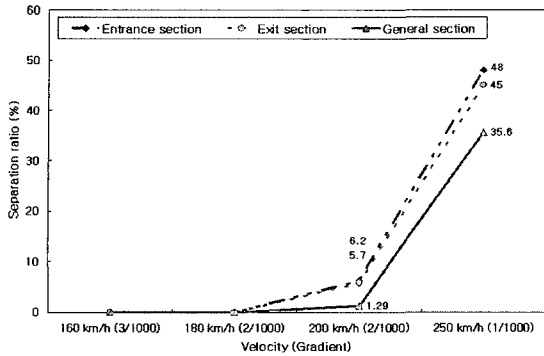


Fig. 16. Separation ratio of front head at general and gradient section(EN standard)

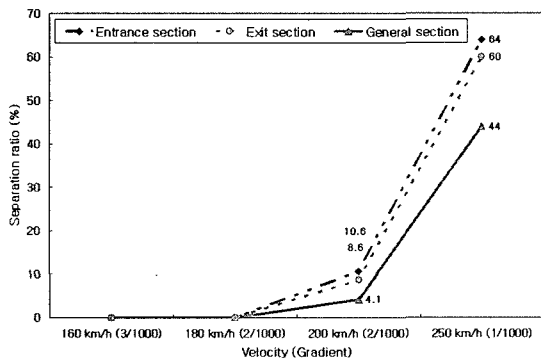


Fig. 17. Separation ratio of rear head at general and gradient section(EN standard)

에서의 접촉력과 압상량 변화를 나타내었다. 해석결과 터널 브래킷에 의해 지지되어 있는 지점에서 접촉력 저하현상을 볼 수 있었고, 압상량의 파동현상이 두드러지게 나타났다.

본 연구에서 태백선 입·출구간의 집전성능도 해석하였다. 구배가 있는 구간에서의 판토품그래프 압상량은 구배에 의한 전차선의 수직변위 만큼 줄어든다. Fig. 16과 Fig. 17에서 일반구간과 입·출구간의 집전성능을 속도별로 비교하였다. 유럽 전차선 속도별 구배 기준치 제한값[7]을 적용하여 해석한 결과 일반구간의 운행 가능속도인 180km/h에서 구배 기준치인 2/1000를 적용하여도 일반구간과의 집전성능의 차이는 없었다. 즉, 입·출구간에 EN 규격을 적용하여도 문제가 없다는 것을 알 수 있었다. 또한 180km/h 이상의 속도에서는 일반구간과 터널 입·출구간의 이선율 차이가 갈수록 두드러지며, 터널 출구보다 입구에서의 이선율이 약간 더 높은 경향을 볼 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 중앙차분법을 이용하여 집전판이 두 개인 3자유도 판토품그래프가 일반구간과 터널구간을 주행할 때, 가선계의 동특성을 해석하는 프로그램을 개발하여 기존선 고속화가 추진 중 태백선에 적용, 판토품그래프와 가선계의 집전성능을 계산하였다. 기존 태백선 전철에 장착되는 SCHUNK'S WBL 85-판토품그래프는 일반구간에서 180km/h, 터널구간에서는 140km/h까지 운행 가능할 것으로 예측되었다. 따라서 터널구간에서 140km/h 이상의 속도를 얻기 위해서는 가선계의 장력 조절, 터널 브래킷의 동적 물성치 변경, 드로퍼 간격 조정 방안을 검토해야 할 것이다. 또한 터널 입·출구간에서 EN 규격에 맞는 구배 기준치 값을 적용한다면 일반구간의 속도를 유지할 수 있음이 확인되었다. 향후 기존선 터널구간에서의 공기역학적 변화까지 고려하여 가선계의 집전성능에 대하여 좀 더 세밀한 연구를 추진할 필요가 있다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Manabe, K., "High-Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System", JSME International Journal, Vol.32, No.2, pp.31-40, 1989.
2. 정대현, 최연선, "고속전철 Catenary/ Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석", 성균관대학교 과학기술연구소, 성대논문집(과학기술편), Vol.42, No.1, pp.377-390, 1991.
3. 조용현, 정홍채, 권혁빈, "터널로 진입하는 고속 전철에 의한 공력변화가 고속 가선계에 미치는 영향 분석(I)", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.333-343, 1999.
4. 권삼영, 이기원, 장상훈, M'hamed Matri, "터널 브래킷을 사용한 가선시스템의 최고속도 예측 및 검토", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.628-635, 2000.
5. 한형석, "시뮬레이션에 의한 고속전철용 집전시스템 매개 변수 연구", 한국철도학회논문집, Vol.6, No.4, pp.279-285, 2003.
6. Schunk Iberica, "Dynamic Behaviour Analysis of SCHUNK'S WBL 85-PANTOGRAPH by means of Numerical Simulation Techniques", Technical College of Industrial Engineering, 2003.
7. 장상훈 외, "고속화에 대응한 가선구조의 특성 최적화 방안 최종 보고서", 한국철도기술연구원, 2000.