

집전시스템의 동적 수치모의 해석에 관한 연구

A Study on a dynamic simulation of Current Collection System

허 신*, 경진호*, 송달호*, 박성훈**, 김정수**
S. Hur, J. H. Kyung, H. S. Han, D. H. Song, S. H. Park, J. S. Kim

ABSTRACT

In this study, we developed the simulation program of an overhead catenary-pantograph system. The overhead catenary is modeled with point mass and the pantograph is replaced with 3 d.o.f model which is composed of mass, spring and damper. Using the developed program, we analyzed the static structure of the overhead catenary and the dynamic characteristics of an overhead catenary-pantograph system such as uplift displacement of contact wire and contact force. we compared the analysis results with the results of GASENDO software developed at RTRI in Japan. The behaviors of uplift displacement of contact wire and contact force were similar with the results of GASENDO software.

1. 서론

고속전철의 개발 선진국은 각국의 상황에 맞는 고유의 가선계를 개발하였고 그 가선계에 적합한 판토히래프를 최적화 하여 왔다. 열차의 고속화에 따라 가선은 단순 형태의 가선으로부터 보다 복잡한 가선으로 변천되어 왔으며, 균일하고 작은 콤프라이언스(compliance)를 유지하고 장력은 크게 하는 방향으로 설계되었다. 판토히래프는 집전부의 경량화, 공기저항 및 소음의 최소화, 집전 전류용량의 증대를 통해서 한 대의 판토히래프로 운행이 가능토록 하므로써 집전성능을 향상시키고 있다.

이러한 기술개발의 배경에는 가선/판토히래프 시스템에 대한 수치 모의해석 및 성능시험이 큰 역할을 하여 왔다. 특히 수치 모의해석은 가선-판토히래프 시스템의 동적 거동에 영향을 주는 많은 성능변수에 대한 분석 및 최적화에 경제적이고 신속하게 이용되고 있다. 가선/판토히래프 시스템의 수치해석 방법으로서, D'Alembert의 이동파법(travelling wave method), 모달 해석법, 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM) 등이 사용되고 있으나, 비선형성 고려 및 고정도 해석 유연성 등이 우수한 유한차분법(FDM) 또는 유한요소법(FEM)이 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 가선계를 유한개의 집중질량으로 구성하고 가선의 내부감쇠를 고려한 현(string)으로 모델링하며, 판토히래프는 3 자유도를 갖는 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링하였다. 이와 같은 집전계의 모델을 이용하여, 가선계의 구조계산과 동적 수치모의해석을 위한 가선계 및 판토히래프의 운동 방정식, 초기조건, 경계조건을 유도하고 유한차분법(FDM)을 이용하여 수치모의해석을 수행하는 프로그램 CAPAS(Catenary and Pantograph Analysis Software)를 개발하였다. TGV-K의 가선계 및 판토히래프의 데이터를 입력하여 수치모의해석을 수행하고 해석결과는 일본의 철도총합기술연구소에서 개발된 가선도와 비교하여 타당성을 검토하였다.

* 한국기계연구원, 신교통기술연구부, 정회원

** 홍익대학교, 기계공학과, 학생회원, 정회원

2. 집전계의 수학적 모델

그림 1은 가선의 한 구간으로서 가선의 양단은 지지 기둥에 의해서 조가선은 고정되어 있고 전차선은 가동브라켓의 곡선당김장치에 의해서 현수되어 있다. 전차선과 조가선은 각각 유한개의 집중질량으로 이루어진 현(string)으로 모델되고 일정한 장력이 작용하고 있다. x축 좌표는 선로 방향의 구간길이를 나타내며, y 및 w축 좌표는 각각 전차선 및 조가선의 변위를 나타내는 절대 좌표이다. 곡선당김장치는 전차선에 편위(staggering)를 주는 역할을 하며 판토히스트의 통과시에 접촉력이 작용하여 수직방향으로 상승하면서 발생하는 수직방향 힘은 등가질량, 스프링계, 감쇠계로 모델링된다.

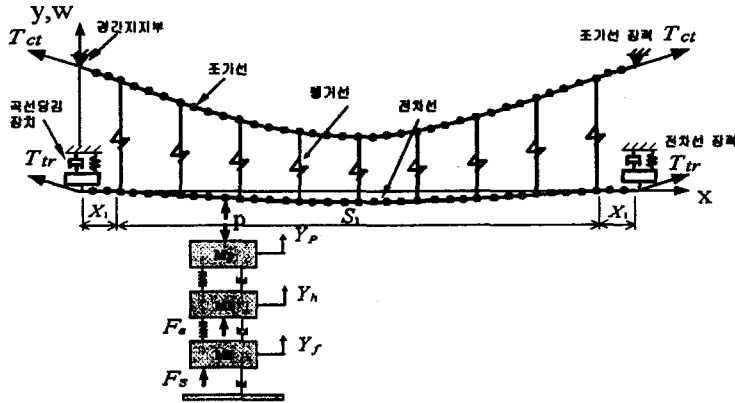


그림 1. 단순 가선계의 구조 및 제원

그림 2는 사전이도(pre-sag)를 갖는 전차선의 변위를 계산하기 위해서 전차선의 분포하중 $q(x_i, t)$, 행거하중 m_{Hg} , 정적 행거힘 F_{Hj} 를 나타내는 작용선도이다. x축은 각 행거선 사이의 위치를 나타내는 국부좌표이고, y축은 전차선의 변위를 나타낸다. 예로서 y_i 는 i 번째 행거 위치 $x_i = 0$ 에서의 전차선 변위이다.

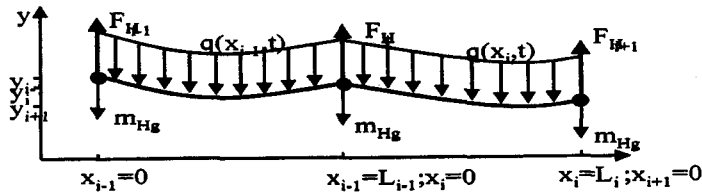


그림 2. 전차선의 변위계산 선도

일반적인 현의 파동방정식으로부터 가선의 정적 평형상태와 그림 2에서 설명된 행거사이의 경계조건식(2.1)을 고려하여 전차선의 변위에 대한 적분을 두번하면, 전차선의 정적 처짐을 계산할 수 있는 식(2.2)를 유도할 수 있다. 또한 이 식은 구간길이 및 가고의 경계조건을 대입하면 조가선의 정적 처짐도 구할 수 있다.

$$y(0) = y_i \quad y(L_i) = y_{i+1} \quad (2.1)$$

$$y(x_i) = \frac{\rho g}{2T} x_i^2 + \left[\frac{y_{i+1} - y_i}{L_i} - \frac{\rho g}{2T} L_i \right] x_i + y_i \quad (2.2)$$

여기서, $y(x_i)$ 는 가선의 변위, ρ 는 가선의 선밀도, T 는 가선의 장력, $q(x, t) = -\rho g$, 즉 가선의 정적하중을 나타내고 있다.

사전이도를 고려한 전차선의 정적 처짐을 계산하기 위해서는 그림 1에서 경간내의 첫번째 행거와 마지막 행거 사이에 사전이도가 주어지므로, $x = x_1$ 와 $x = S_1+x_1$ 에서 전차선의 처짐이 제로가 되는 경계조건을 사용하여 파동방정식을 풀면 식(2.3)이 유도된다.

$$y_i = \frac{\rho g}{2T}(x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1) \quad (2.3)$$

경간 중앙에서의 최대 이도를 y_c 로 표시하면 $y_c = \rho g S_1^2 / 8T$ 이므로, 이 식을 식(2.3)에 대입하면 전차선의 사전이도 변위를 계산하는 식(2.4)를 구할 수 있다.

$$y_i = \frac{4d_c}{S_1^2}(x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1) \quad (2.4)$$

정적 행거힘은 전차선 및 행거선 하중이 각 행거에 작용하는 힘으로서 정적 구조계산에서 중요한 부분을 차지한다. 정적 행거힘의 계산식(2.5)는 전차선의 i 번째 행거지점을 중심으로 왼쪽 절점과 오른쪽 절점사이의 기울기 차와 장력을 곱한 다음, 행거선 하중을 더한 식이다.

$$F_{Hi} = m_{Hg} + T_v \left[\frac{\partial y_i(0^+)}{\partial x_i} - \frac{\partial y_i(0^-)}{\partial x_i} \right] \quad (2.5)$$

여기서 $y_i(0^+), y_i(0^-)$ 는 i 번째 행거선 위치 x_i 에서 각각 우측 및 좌측의 전차선 절점 변위를 나타내고 있다.

3. 가선 및 판토크래프의 운동 방정식

조가선의 운동방정식은 식(3.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_a \frac{\partial^2 w(x_i, t)}{\partial t^2} - T_a \frac{\partial^2 w(x_i, t)}{\partial x^2} + C_a \left(\frac{2 \partial w(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial w(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial w(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = -f(x_i, t) \quad (3.1)$$

여기서, $w(x_i, t)$ 는 i 번째 절점의 조가선 변위를 나타내며, T_a, ρ_a 는 각각 조가선의 장력과 선밀도를, $f(x_i, t)$ 는 i 번째 절점이 행거선 지점일 경우에 대해서 조가선에 작용하는 힘으로서 $f(x_i, t) = f_i \cdot \delta(x - x_i)$ 로 작용한다. 또한 C_a 는 조가선의 내부 감쇠상수이다.

전차선의 운동방정식은 식(3.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_v \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} - T_v \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial x^2} + C_v \left(\frac{2 \partial y(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = f(x_i, t) + p \cdot \delta(x_i - vt) \quad (3.2)$$

여기서, $y(x_i, t)$ 는 i 번째 절점의 전차선 변위를 나타내며, T_v, ρ_v 는 각각 전차선에 걸리는 장력과 전차선의 선밀도를, $f(x_i, t)$ 는 i 번째 절점이 행거선 위치일 경우에 대해서 전차선에 작용하는 힘으로서 $f(x_i, t) = f_i \cdot \delta(x - x_i)$ 로 작용한다. 또한 C_v 는 전차선의 내부감쇠상수이다. $p \cdot \delta(x_i - vt)$ 는 판토크래프의 집전판과 전차선 사이에 작용하는 접촉력을 나타낸다.

조가선의 i 번째 절점위치가 경간지지점일 경우, 조가선 운동방정식은 조가선이 고정되어 있는 것으로 가정하여 임의의 시간에 대해서 조가선의 변위는 가고 높이인 $w(x_i, t) = 1.4$ m로 표현한다.

경간지지점에서의 전차선 운동방정식은 식(3.3)으로 표현된다. 경간지지점에서는 행거선이 존재하지 않으므로 행거힘이 없으며, 전차선은 등가질량, 스프링상수, 감쇠상수를 갖는 곡선당김장치와 연결되어 있다.

$$\rho_v \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} - T_v \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial x^2} + C_v \left(\frac{2 \partial y(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\delta x} \left(m_s \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} + \gamma_s \frac{\partial y(x_i, t)}{\partial t} + s_s y(x_i, t) \right) + p \cdot \delta(x_i - vt) \quad (3.3)$$

여기서, m_s, γ_s, s_s 는 각각 곡선당김장치의 등가질량, 감쇠상수, 스프링상수를 의미하고, δx 는 곡선당김금구에 의해서 지지되는 전차선의 미소길이이다.

조가선의 i 번째 절점 지점이 한 인류구간의 양단지점일 경우, 조가선 운동방정식은 조가선이 고정되어 있는 것으로 가정하여 임의의 시간에 대해서 조가선의 변위는 가고 높이인 $w(x_i, t) = 1.4 \text{ m}$ 를 적용한다.

전차선의 i 번째 절점 지점이 한 인류구간의 양단지점일 경우, 전차선의 운동방정식은 전차선이 고정되어 있는 것으로 가정하여 임의의 시간에 대해서 초기 정적처짐 변위인 $y(x_i, t) = -0.0066 \text{ m}$ 를 적용한다.

조가선 및 전차선의 내부감쇠값 C_{cr} , C_r 는 집중질량 사이의 속도차에 비례하는 점성감쇠로서 작용하며, 각각의 선요소의 임계 감쇠값의 3~6%의 값을 이용한다. 가선의 감쇠값을 절점간의 등가 선형댐퍼로 모델링한 경우에는 감쇠비(damping ratio)를 실험적으로 구할 필요가 있다. 가선의 집중질량 모델의 임계 감쇠값은 저차 진동의 경우에는 근사적으로 식(3.4)로 계산한다. [1]

$$C_{cr} = \frac{2\ell}{n\pi d} \sqrt{\rho T} \quad (3.4)$$

여기서 ℓ , d , ρ , T , n 은 각각 경간길이, 절점간 거리, 선밀도, 장력, 진동모드의 차수를 나타낸다. 수치해석시, 가선의 진동은 주로 저차 모드인 1차($n=1$)의 경우의 임계 감쇠값을 기본으로 하고 감쇠값은 식(3.5)로 구한다.

$$C = \xi \cdot C_{cr} \quad (3.5)$$

판토그래프 모델은 그림 1과 같이 집전판, 집전판 지지부, 메인프레임의 등가질량 m_p , m_h , m_f 으로 구성되는 3 자유도 모델이며, 스프링상수 S_p , S_h , S_f 와 감쇠상수 γ_p , γ_h , γ_f 가 적용된다. 또한 집전판에는 접촉력 P 가 작용하고 메인프레임 등가질량에는 정적압상력 P_0 가 작용하고 집전판지지부에는 공력 $p_1 = k_a V^2$ 이 작용한다. 여기서, V 는 주행속도이고 k_a 는 공력계수이다. 집전판, 집전판 지지부, 메인프레임의 운동 변위는 각각 Y_p , Y_h , Y_f 으로 나타낸다.

판토그래프의 운동방정식은 각각 집전판, 집전판 지지부, 메인프레임에 대해서 유도되었다. 집전판의 운동방정식은 식(3.6), 집전판 지지부의 운동방정식은 식(3.7), 메인프레임의 운동방정식은 식(3.8)로 표현된다.

$$m_p \frac{\partial^2 Y_p}{\partial t^2} + \gamma_p \left(\frac{\partial Y_p}{\partial t} - \frac{\partial Y_h}{\partial t} \right) + S_p (Y_p - Y_h) + P = 0 \quad (3.6)$$

$$m_h \frac{\partial^2 Y_h}{\partial t^2} + S_h (Y_h - Y_f) + \gamma_h \left(\frac{\partial Y_h}{\partial t} - \frac{\partial Y_f}{\partial t} \right) = S_p (Y_p - Y_h) + \gamma_p \left(\frac{\partial Y_p}{\partial t} - \frac{\partial Y_h}{\partial t} \right) + P_1 \quad (3.7)$$

$$m_f \frac{\partial^2 Y_f}{\partial t^2} + S_f Y_f + \gamma_f \frac{\partial Y_f}{\partial t} = S_h (Y_h - Y_f) + \gamma_h \left(\frac{\partial Y_h}{\partial t} - \frac{\partial Y_f}{\partial t} \right) + P_0 \quad (3.8)$$

식(3.6)에서 P 는 접촉력을 나타내고 식(3.7)에서 P_1 는 판토그래프의 공력을 나타내며 식(3.8)에서 P_0 는 정적압상력을 나타낸다.

전차선 및 조가선 절점의 변위에 대한 초기조건은 정적 구조계산의 결과를 사용한다. 속도, 가속도에 대한 초기조건은 모두 제로로 한다. 또한, 판토그래프 모델의 초기조건은 변위, 속도, 가속도를 모두 제로로 한다.

전차선과 판토그래프의 운동방정식은 시간 및 공간에 따라 변하게 되는 접촉력과 연성되어 있으며 그 해석적 답(analytic solution)을 구하는 것은 용이하지 않으므로 수치해석 방법으로 유한차분식을 이용한다. 일반적으로 차량의 최고 주행속도는 설치된 가선계의 파동전파속도의 70% 이내로 설계되므로, 해석을 위한 시간 간격 Δt , 절점 간격 Δx 를 선정함에 있어서 수렴성과 안정성을 만족하는 범위내에서 적절한 값을 택하였다. 시간과 공간에 대해 독립적인 양단의 가선 변위에 대한 경계조건을 제외하고, 위의 가선과 판토그래프에 대한 유한차분식을 정리한다. 그러면 전차선 및 조가선 변위에 대한 6개의 변수 y_{i-1}^{k+1} , y_i^{k+1} , y_{i+1}^{k+1} 및 w_{i-1}^{k+1} , w_i^{k+1} , w_{i+1}^{k+1} 가 포함된 방정식을 얻을 수 있다. 이를 절점 i 에 대한 변위에 대해서 전체 식을 유도하여 정리하면, 식

(3.9)와 같은 Tri-diagonal 행렬식을 얻을 수 있다. 여기서, 오른쪽 행렬인 \$Z_i\$ 값은 이미 알려진 상수항이며 접촉력과 행거힘의 항이 포함되어 있다. 행렬식(3.9)는 가우스 소거법을 수정한 Thomas algorithm을 사용하여 해석한다.

$$\begin{bmatrix} (1-2a_1) & a_1 & 0 & & & & & & & \\ a_1 & (1-2a_1) & a_1 & & & & & & & \\ 0 & a_1 & (1-2a_1) & a_1 & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ a_1 & (1-2a_1) & a_1 & 0 & & & & & & \\ & a_1 & (1-2a_1) & a_1 & & & & & & \\ & & 0 & a_1 & (1-2a_1) & & & & & \\ & & & & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^{k+1} \\ w_2^{k+1} \\ w_3^{k+1} \\ \vdots \\ w_i^{k+1} \\ \vdots \\ w_{nN-3}^{k+1} \\ w_{nN-2}^{k+1} \\ w_{nN-1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_{nN-3} \\ Z_{nN-2} \\ Z_{nN-1} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

4. 접촉력 및 행거힘의 계산

집전시스템의 해석을 위해서는 전차선과 판토히레프사이의 접촉력을 정확히 구하는 것이 중요하다. 해석의 출발점은 전차선의 변위와 판토히레프 집전판의 변위가 같다고 가정하는 것이다. 그림 3에서 만약 전차선과 판토히레프 집전판이 이선이 되어있지 않고, 전차선상에 집중분포되어 있는 질량사이에서의 변위를 선형적으로 가정하면, 변위의 보간식(4.1)이 성립하게 된다.[2]

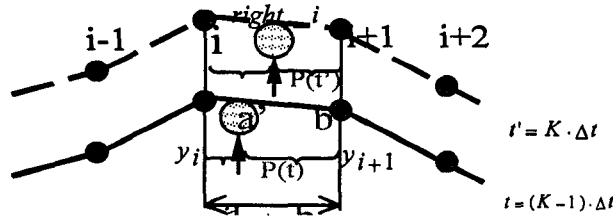


그림 3. 보간식을 이용한 접촉력 계산

$$Y^k = \frac{a y_i^k + b y_{i+1}^k}{(a+b)} \quad (4.1)$$

여기서, $a = V \cdot (k-1)\Delta t - \text{right}_i \cdot \Delta x$

$b = \text{right}_i \cdot \Delta x - V \cdot (k-1)\Delta t$ 이며,

V 는 판토히레프의 진행속도, k 는 시간의 증분 번호, right_i 는 판토히레프가 위치하는 질점사이에서 오른쪽 질점 번호를 나타낸다.

시간 $t = (k-1) \cdot \Delta t$ 에서 판토히레프가 질점사이에 위치해 있을 경우, 접촉력 $p(t)$ 는 다음의 식(4.2)에 의해서 양쪽 질점에 $F(t)$ 에 의해서 분배된다.

$$\begin{aligned} F(t) &= b \cdot p(t) / (\Delta t)^2, \text{ 만일 } i = \text{right}_i - 1 \\ &= a \cdot p(t) / (\Delta t)^2, \text{ 만일 } i = \text{right}_i \\ &= 0, \text{ 그외의 경우} \end{aligned} \quad (4.2)$$

행거힘의 계산은 임의의 시간 t 에서의 초기 행거힘을 가정하여 전차선 변위 $y(x_i, t)$ 및 조가선 변위 $w(x_i, t)$ 를 구하고 정적구조 계산에서 결정된 전차선 및 조가선의 초기변위 $y(x_i, 0)$ $w(x_i, 0)$ 와 비교하게 된다. 만일 초기변위보다 크다면 반복수행법을 사용하여 초기변위와 같아질 때까지 행거힘을 증가시키고, 만일 초기변위보다 작다면 초기변위와 같아질 때까지 행거힘을 감소시켜 행거힘을 결정하게 된다.

5. 집전 시스템의 입력데이터

수치모의해석시 사용되는 가선계는 TGV-K의 단순 가선계이며 경간은 63m, 행거수는 9개, 가고는 1.4m, 사전 이도는 경간 길이의 1/2000이다. 행거 질량은 전차선과 조가선을 고정하는 클램프의 질량을 포함한 0.36 kg이다. 행거 간격은 4.5 m, 6.75 m이고 질점 간격은 0.45 m, 해석 시간 간격은 전체 주행시간을 9800으로 나눈 값을 사용하였다. 또한 가선 경계에서의 파동 반사의 영향을 감소시키고 해석 데이터의 신뢰성을 보장하기 위하여 판토품의 운행거리는 10 경간의 630m로 하였다. 판토품은 GPU 판토품 데이터를 사용하였다. 표 1은 가선계 및 판토품의 입력 데이터이다. 곡선당감장치의 데이터는 등가질량 0.61 kg, 스프링 상수 218 N/m, 감쇠상수 0.23 Ns/m를 사용하였다. [3]

표 1. 가선계 및 판토품의 입력 데이터

항목	선밀도 (kg/m)	장력 (kN)	감쇠비	항목	등가질량 (kg)	스프링 상수(N/m)	감쇠상수 (Ns/m)	압상력 (N)	공력계수 (N/(Km/h) ²)
조가선	0.605	14.0	0.01	팬 헤드부	8.1	9,000	6.0	-	-
전차선	1.334	20.0	0.05	중간지지부	8.0	1,200	0	-	0.00133
행거선	0.108	-	-	메인프레임부	23.1	-	140	70	-

6. 수치 모의해석 결과

그림 4는 TGV-K 가선계의 10개 경간에 대해서 정적 구조해석을 수행한 결과이다. 조가선의 최대 처짐량은 경간 중앙에서 약 670mm이었으며, 전차선의 사전 이도(경간 중앙점에서 31.5 mm)에 따라서 행거 길이, 정적 행거힘이 결정되었다.

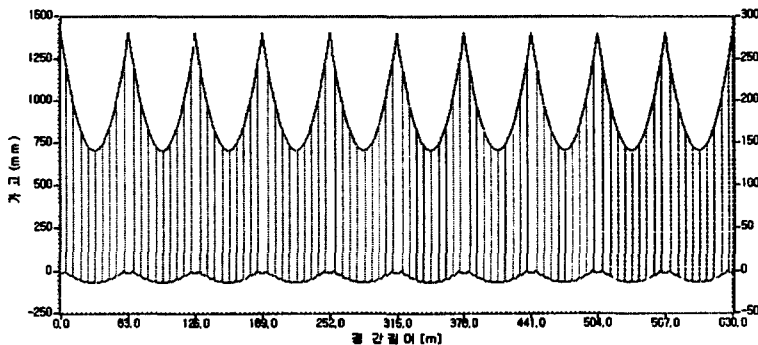


그림 4. 정적 처짐해석 결과

가선 및 판토품의 동적 수치모의해석을 위해서 자체개발 프로그램 CAPAS를 사용했으며, 해석결과는 일본의 철도총합기술연구소에서 개발된 상용 프로그램 『가선도』의 해석결과와 비교한다. 접촉력의 해석 결과에서는 해석 시간간격 Δt 마다 접촉력이 계산되는 관계로 고주파 성분의 접촉력이 포함되어 있다. 일본의 가선도는 어떤 범위의 저주파 필터를 사용하는지 알려지지 않았으므로, 20 Hz 저주파 필터를 사용하는 독일의 필터링 조건을 접촉력을 필터링하였다.

그림 5 및 6은 차량속도 $V = 200$ km/h일 경우에 대해서 접촉력과 전차선의 변위를 나타내고 있다. 접촉력의 경우, 경간 지지점에서 발생하는 피크가 CAPAS보다 가선도의 해석결과가 크게 나타나고 있지만 그 외에는 비교적 잘 일치하고 있으며, 경간 지지점에서 최대 접촉력이 발생하고 경간 중앙부에서 최소 접촉력이 발생하고 있다. 전차선 압상변위의 경우, 가선도의 해석결과가 약 5mm정도 더 크게 나타나지만 비교적 잘 일치하고 있으며, 경간의 2/3 지점에서 최대 변위가 발생한다.

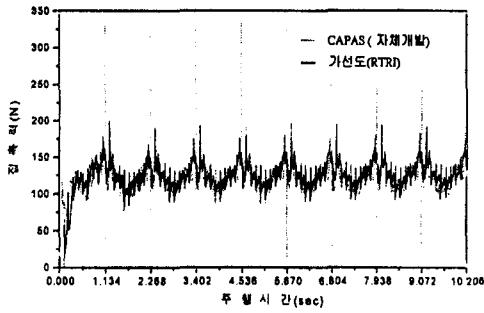


그림 5. 접촉력의 해석 결과(V=200 km/h)

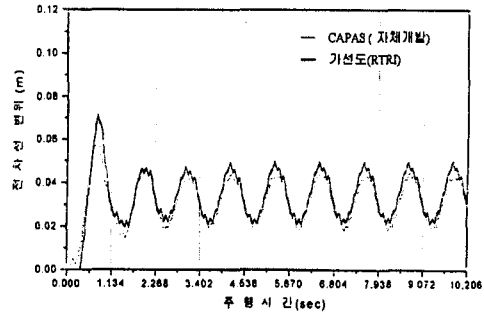


그림 6. 전차선 변위의 해석 결과(V=200 km/h)

그림 7 및 8은 차량속도 $V = 250 \text{ km/h}$ 일 경우에 대해서 접촉력과 전차선의 변위를 나타내고 있다. 접촉력의 경우, CAPAS와 가선도가 비교적 경향은 일치하나 가선도 해석결과가 경간의 지지점 근방에서 접촉력 피크가 크게 발생하고 있다. 전차선 압상변위의 경우, 가선도 해석값이 최대 10mm 정도로 더 크게 나타나고 있으나 전차선 변위의 경향은 비교적 일치한다.

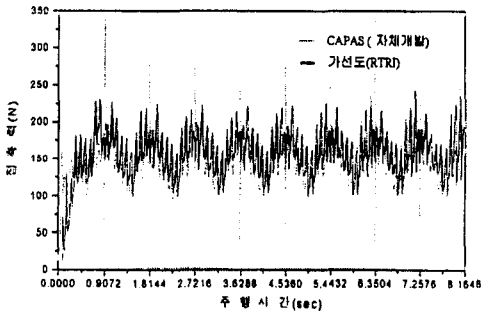


그림 7. 접촉력의 해석 결과(V=250 km/h)

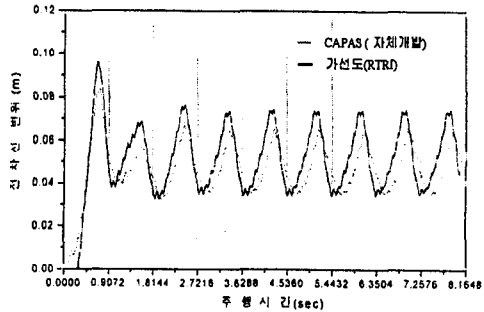


그림 8. 전차선 변위의 해석 결과(V=250 km/h)

그림 9 및 10은 차량속도 $V = 300 \text{ km/h}$ 일 경우에 대해서 접촉력과 전차선의 변위를 나타내고 있다. 접촉력의 경우, 가선도 해석값의 피크가 크게 나타나고 있으며, 경간 지지점에서 최대 접촉력이 발생하고 경간의 2/3 지점에서 최소 접촉력이 발생하고 있다. 전차선 압상변위의 경우, 가선도 해석값이 최대 15 mm 정도로 더 크게 나타나고 있으나, 전차선 변위의 운동 경향은 비교적 잘 일치한다.

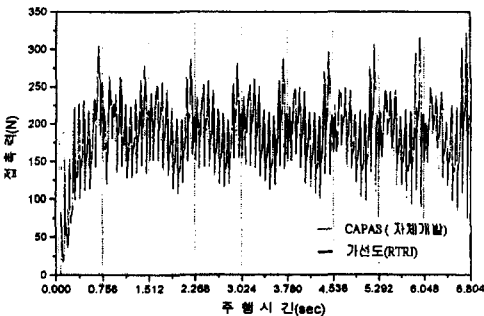


그림 9. 접촉력의 해석 결과(V=300 km/h)

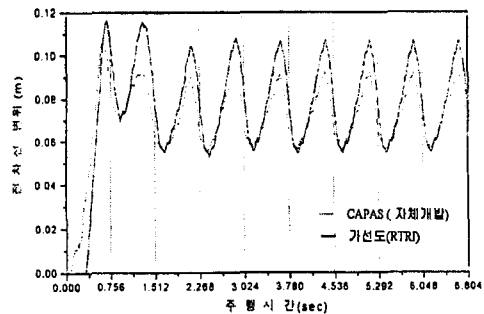


그림 10. 전차선 변위의 해석 결과(V=300 km/h)

위의 해석결과에서 대체적으로 접촉력의 피크값이 CAPAS보다 가선도가 크게 나타난 이유는 가선의 내부 감쇠값이 서로 동일하지 않을 수가 있기 때문인 것으로 판단된다.

표 2는 자체개발 프로그램 『CAPAS』와 일본 철도종합기술연구소에서 개발된 상용 프로그램 『가선도』의 해석결과를 정리한 것이다. 차량속도 200, 250 및 300 km/h일 경우에 대해서, 평균 접촉력, 전차선의 평균 압상변위 및 각각의 표준편차에 대해서 비교를 하였다. 차량속도 200, 250 및 300 km/h일 경우에 대해서, CAPAS 대 가선도의 평균접촉력은 각각 96%, 97%, 99%로 비교적 잘 일치하며, 접촉력의 표준편차는 76%, 84%, 91%로 속도가 증가할수록 차이가 나고 있다. 또한 CAPAS 대 가선도의 전차선의 평균 압상변위는 각각 94%, 94%, 97%로 비교적 잘 일치하며, 평균 압상변위의 표준편차는 각각 75%, 75%, 1.01%로 속도가 증가할수록 차이가 나고 있다.

표 2. 개발 프로그램(CAPAS) 및 상용 S/W(가선도)의 해석결과 비교

차량속도 (km/h)	비교성능	자체개발* (CAPAS)	상용 (가선도)	자체/상용	비교성능	자체개발 (CAPAS)	상용 (가선도)	자체/상용
300	평균접촉력 (N)	180.2	189.5	0.95	전차선 평균변위 (m)	0.073	0.078	0.94
	표준편차 (N)	29.4	38.6	0.76	표준편차 (m)	0.012	0.016	0.75
250	평균접촉력 (N)	147.9	152.7	0.97	전차선 평균변위 (m)	0.048	0.051	0.94
	표준편차 (N)	22.9	27.4	0.84	표준편차 (m)	0.0094	0.0126	0.75
200	평균접촉력 (N)	121.5	122.6	0.99	전차선 평균변위 (m)	0.032	0.033	0.97
	표준편차 (N)	14.7	16.2	0.91	표준편차 (m)	0.009	0.0089	1.01

* 자체개발 프로그램에서 해석한 접촉력은 20 Hz low-pass filtering을 하였음.

7. 결론

가선 및 판토히그래프의 정적 및 동적 운동방정식, 초기조건 및 경계조건을 유도하고 유한차분법을 이용하여 수치모의해석을 하였다. 또한 접촉력 및 동적 행거힘 계산을 위한 알고리즘을 개발하고 적용하였다. 차량속도 200, 250, 300 km/h에 대해서 접촉력 및 전차선의 압상변위에 대한 수치모의해석 결과, 접촉력의 분포 및 전차선의 압상변위의 거동에 대한 경향이 가선도와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 속도가 증가할수록 피크 발생은 가선도 해석 결과값이 약간 크게 발생했다. 그 원인은 CAPAS와 가선도에서 사용된 가선의 내부감쇠값이 서로 다를 수 있는 이유때문인 것으로 판단된다. 차량속도 200, 250, 300 km/h에 대해서 접촉력 및 전차선의 압상변위의 평균값과 표준편차를 비교한 결과, 접촉력 및 전차선의 압상변위의 평균값은 94 %이상으로 비교적 잘 일치하였다. 접촉력 및 전차선의 압상변위의 표준편차는 차량속도 200 km/h일 경우는 91 %이상으로 비교적 잘 일치하나, 250, 300 km/h일 경우는 상대오차가 25 % 정도되고 있다. 그 원인또한 CAPAS와 가선도에서 사용된 가선의 내부감쇠값의 영향인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강원신랑 (1970), "고속집전의 동력학적 연구(제1보, 고속집전계의 모델과 그 검토)", 일본기계학회논문집, 36권, 287호,
2. Y. Fujii, K. Manabe, "Computer Simulation for Dynamics of Overhead Catenary-Pantograph System", Computers in Railways, pp.51-59
3. 허 신, 경진호, 송달호 (1998), "한국형 고속전철 집전 시스템의 동적설계에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회는논문집, pp.445~451.
4. 철도종합기술연구소, "가선도-s1 Ver.1 매뉴얼"