

# 고속 집전계의 동적 수치모의해석 프로그램 연구

## A Study on the Dynamic Simulation of High Speed Current Collection System

허 신<sup>1</sup>, 경진호<sup>1</sup>, 송달호<sup>2</sup>, 김정수<sup>3</sup>, 조용현<sup>4</sup>

S. Hur, J. H. Kyung, D. H. Song, J. S. Kim, Y. H. Cho

**Keywords:** Catenary system(가선계), Current collection system(집전계), Contact force(접촉력), Finite difference method(유한차분법), Dynamic Simulation(동적 수치모의해석)

### Abstract

In this study, we have developed the static and dynamic simulation program of a high speed current collection system. The catenary wire is modeled to discrete masses connected by massless strings and the pantograph is replaced with 3 d.o.f equivalent models that are composed of masses, springs and dampers. We derived partial differential equations of motion from the equivalent model and developed the simulation program. Then, we calculated the static equilibrium state of the overhead catenary and the dynamic behaviors of the high speed current collection system. The analysis results were compared with the results of GASENDO software developed at RTRI in Japan.

### 1. 서 론

고속전철을 개발한 프랑스, 독일, 일본 등은 각 나라의 실정에 적합한 고유의 가선계를 개발하였으며, 또한 그 가선계에 적합한 판토히프 시스템을 최적화하여 왔다. 열차의 고속화를 위하여 가선은 단순한 형태의 가선계로부터 보다 복잡한 가선계로 변천되어 왔으며, 경점(hard point)을 줄이기 위해서 가선의 탄성(elasticity)을 균일하게 하고 장력은 증가하는 방향으로 진행되었다. 판토히프는 집전부의 경량화, 공기저항 및 소음의 최소화, 집전 전류용량의 증대를 통하여 한 대의 판토히프로 운행이 가능토록 하여 집전 성능을 향상시켜 왔다[1].

이러한 기술개발의 배경에는 가선계 및 판토히프 시스템에 대한 수치모의해석 및 성능시험이 큰 역할을

하여 왔다. 특히 수치모의해석은 가선계 및 판토히프 시스템의 동적 거동에 영향을 주는 많은 성능변수에 대한 분석 및 최적화에 경제적이고 신속하게 이용되었다. 수치해석 방법으로는, 해석해법(analytic methods)인 D'Alembert의 이동파법(travelling wave method) 및 모달 해석법 등이 있고, 근사해법으로는 유한차분법(FDM) 및 유한요소법(FEM) 등이 사용되고 있다. 가선과 판토히프의 운동방정식은 시간 및 공간에 따라 변화하는 접촉력과 연성되어 있으므로 해석해(analytic solution)를 구하는 것은 용이하지 않아 비선형성 고려 및 고정도 해석에 유리한 유한차분법(FDM) 또는 유한요소법(FEM)이 많이 사용되고 있다 [2].

본 연구에서는 단순 가선계와 고속용 판토히프의 등가 모델에 대해서 편미분 운동방정식을 유도하고 유도된 운동방정식을 유한차분식으로 변환하였다. 또한, 조가선과 전차선, 전차선과 판토히프 사이의 상호작용을 표현하는 드래퍼힘 및 접촉력 계산 알고리즘을 제시하고 이에 대한 수치모의해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위해서

\*1 정희원, KIMM, 신교통기술연구부, 선임연구원

\*2 정희원, KIMM, 신교통기술연구부, 책임연구원

\*3 정희원, 홍익대학교, 기계공학과, 교수

\*4 정희원, KRRI, 시스템개발팀, 선임연구원

TGV 가선계 및 GPU 판토타그래프의 제원 및 특성 데이터를 입력하여 수치모의해석을 수행하고 일본의 철도종합기술연구소(RTRI)에서 개발된 상용 프로그램 『가선도』의 해석 결과와 비교하였다.

## 2. 집전계의 수학적 모델

Fig. 1은 단순 가선계의 구조를 보이고 있다. 가선계의 구성은 전차선(Contact wire), 조가선(Messenger wire), 드라퍼, 자동장력조정장치, 가동브래킷 등으로 구성된다. 조가선은 지지부에 의해서 수직방향의 변위가 구속되고 수평방향의 변위는 구속되지 않는다. 전차선과 조가선은 일정한 장력을 받는다. 가선의 인류구간 양단은 조가선과 전차선의 수평 및 수직 방향 변위가 모두 구속된다. x축 좌표는 선로방향의 가선 길이를 나타내며, y 및 w축 좌표는 각각 전차선 및 조가선의 변위를 절대좌표로 나타낸다.

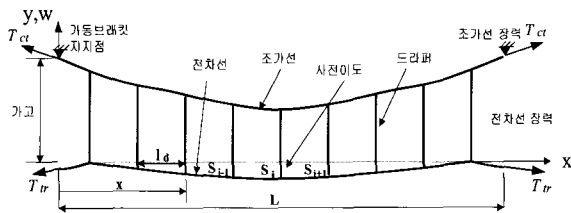


Fig. 1 A structure of simple catenary system

### 2.1 가선계의 정적구조 계산식

가선을 현으로 표현한 파동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = q(x, t) \quad (1)$$

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

가선이 정적 평형상태에 있을 경우, 식(1)의 관성항은 제로이므로 변위  $x$ 에 관해서 오른쪽 항을 두 번 적분하면 가선의 변위에 관한 식(2)를 얻을 수 있다.

$$w(x) = \frac{\rho g}{2T} x_i^2 + C_1 x_i + C_2 \quad (2)$$

Fig. 1의 가선계에서 경간 양단의 가고(encumbrance)가 동일하다면 조가선 지지점의 경계조건은 식(3)과 같이 된다. 경계조건 식(3)을 식(2)에 대입하면 한 경간에서의 조가선 처짐을 계산할 수 있는 식(4)를 얻는다.

$$w(0) = w(L) = w_i \quad (3)$$

$$w(x_i) = \frac{\rho_{ct} g}{2T} x_i^2 - \frac{\rho_{ct} g}{2T} L x_i + w_i \quad (4)$$

여기서 가선의 선밀도  $\rho_{ct}$ 는 조가선, 전차선 및 드라퍼 질량을 포함한다.

전차선의 정적 처짐을 계산하기 위해서는 Fig. 1의  $i$ 번째 및  $i+1$ 번째 드라퍼의 사전이도  $S_i, S_{i+1}$ 로 주어진 경계조건 식(5)를 이용하여 각 드라퍼 사이의 전차선 처짐을 계산할 수 있는 식(6)을 얻는다.

$$y(0) = S_i \quad y(l_d) = S_{i+1} \quad (5)$$

$$y(x_i) = \frac{\rho_{tr} g}{2T} x_i^2 + \left[ -\frac{S_{i+1} - S_i}{l_d} - \frac{\rho_{tr} g}{2T} l_d \right] x_i + S_i \quad (6)$$

여기서,  $\rho_{tr}$ 는 전차선의 선밀도,  $l_d$ 는 드라퍼 사이의 간격을 나타낸다.

정적 평형상태에서 조가선과 전차선 사이를 연결하는 드라퍼에는 정적 드라퍼 힘이 작용한다. 전차선 및 드라퍼 자중으로 인해 각 드라퍼에 작용하는 힘은 임의의  $i$ 번째 드라퍼 지점을 중심으로 전차선의 왼쪽과 오른쪽의 기울기에서 발생하는 힘과 드라퍼 자중을 더한 것으로 식(7)로 표현할 수 있다.

$$F_{di} = m_d + T_{tr} \left[ \frac{\partial y_i'}{\partial x_i} - \frac{\partial y_{i+1}'}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

여기서  $F_{di}$ 는  $i$ 번째 드라퍼의 정적 드라퍼힘,  $m_d$ 는 드라퍼의 자중,  $T_{tr}$ 은 전차선의 장력,  $\partial y_i' / \partial x_i$  및  $\partial y_{i+1}' / \partial x_i$ 는  $i$ 번째 드라퍼 위치를 기준으로 각각 우측 및 좌측의 전차선 처짐의 기울기를 나타내고 있다.

### 2.2 가선계의 동적 해석모델

Fig. 2에서와 같이 가선계의 동적 해석모델은 전차

선과 조가선이 질량없는 현(string)으로 연결된 유한개의 질점으로 모델링되고 굽힘강성은 고려되지 않으며, 조가선과 전차선의 질점 위치는 상대 좌표계로 표시된다. 조가선 및 전차선의 내부 감쇠는 질점 사이의 속도차에 비례하는 점성 감쇠로 취급한다. 조가선은 공간 지지점에서 수직변위가 구속되고 전차선은 질량, 스프링, 댐퍼로 구성된 곡선당김금구에 의해 지지된다. 가선의 정적구조해석에서 계산된 정적 드라퍼힘은 동적 해석을 위한 초기 드라퍼힘으로 사용한다.

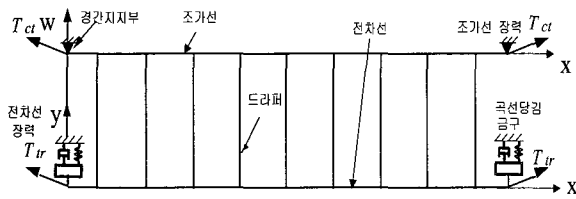


Fig. 2 A dynamic models of simple catenary system

조가선의 운동방정식은 식(8)과 같이 표현된다.

$$\rho_{ct} \frac{\partial^2 w(x_i, t)}{\partial t^2} - T_{ct} \frac{\partial^2 w(x_i, t)}{\partial x^2} + C_{ct} \left( \frac{2 \partial w(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial w(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial w(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = -f(x_i, t) \quad (8)$$

여기서,  $w(x_i, t)$ 는 임의의 시간  $t$ 와 질점위치  $x_i$ 에서의 조가선 변위를 나타내며,  $T_{ct}$ ,  $\rho_{ct}$ ,  $C_{ct}$ 는 각각 조가선의 장력과 선밀도, 내부 감쇠계수를 나타낸다.  $f(x_i, t)$ 는 질점위치  $x_i$ 가 드라퍼 지점일 경우, 드라퍼에 의해서 조가선에 전달되는 힘을 나타낸다.

전차선의 운동방정식은 식(9)와 같이 표현된다.

$$\rho_{tr} \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} - T_{tr} \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial x^2} + C_{tr} \left( \frac{2 \partial y(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = f(x_i, t) + p(t) \cdot \delta(x_i - vt) \quad (9)$$

여기서,  $y(x_i, t)$ 는 임의의 시간  $t$ 와 질점위치  $x_i$ 에서의 전차선 변위를 나타내며,  $T_{tr}$ ,  $\rho_{tr}$ ,  $C_{tr}$ 는 각각 전차선의 장력과 선밀도, 내부 감쇠상수를 나타낸다.  $f(x_i, t)$ 는 질점위치  $x_i$ 가 드라퍼 지점일 경우, 드라퍼

에 의해서 전차선에 전달되는 힘을 나타낸다.  $p(t) \cdot \delta(x_i - vt)$ 는 판토히크의 집전판과 전차선 사이에 작용하는 접촉력을 나타낸다.

공간 지지점에서 곡선당김금구에 의해서 지지되는 전차선의 운동방정식은 식(10)으로 표현된다.

$$\rho_{tr} \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} - T_{tr} \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial x^2} + C_{tr} \left( \frac{2 \partial y(x_i, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i-1}, t)}{\partial t} - \frac{\partial y(x_{i+1}, t)}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\delta x} \left( m_s \frac{\partial^2 y(x_i, t)}{\partial t^2} + \gamma_s \frac{\partial y(x_i, t)}{\partial t} + s_s y(x_i, t) \right) + p(t) \cdot \delta(x_i - vt) \quad (10)$$

여기서,  $m_s$ ,  $\gamma_s$ ,  $s_s$ 는 각각 곡선당김금구의 등가질량, 감쇠상수, 스프링상수이고,  $\delta x$ 는 곡선당김금구에 의해서 지지되는 전차선의 미소길이이다.

전차선 및 조가선 질점의 속도 및 가속도에 대한 초기조건은 제로로 한다.

### 2.3 판토히크의 동적 해석모델

판토히크는 Fig. 3과 같이 집전판, 집전판 지지부, 메인프레임의 운동을 표현하는 3 자유도의 등가모델로 구성하며, 등가질량은  $m_p$ ,  $m_h$ ,  $m_f$ , 스프링상수는  $s_p$ ,  $s_h$ ,  $s_f$ , 감쇠상수는  $\gamma_p$ ,  $\gamma_h$ ,  $\gamma_f$ 로 표현한다. 또한 전차선과 판토히크의 집전판 사이는 접촉력  $p$ 가 작용하고 집전판지지부에는 공력  $p_a = k_a V^2$ 이 작용하며 메인프레임에는 정적 압상력  $p_s$ 가 작용한다. 여기서,  $V$ 는 주행속도이고  $k_a$ 는 공력계수이다. 집전판, 집전판 지지부, 메인프레임의 운동 변위는 각각  $y_p$ ,  $y_h$ ,  $y_f$ 로 표현된다.

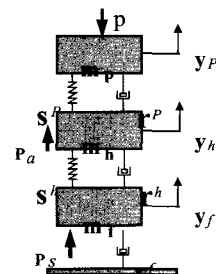


Fig. 3 An equivalent model of pantograph

집전판의 운동방정식은 식(11), 집전판 지지부의 운동방정식은 식(12), 메인프레임의 운동방정식은 식(13)으로 표현된다.

$$m_p \frac{\partial^2 y_p}{\partial t^2} + \gamma_p \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_h}{\partial t} \right) + s_p (y_p - y_h) + p = 0 \quad (11)$$

$$m_h \frac{\partial^2 y_h}{\partial t^2} + s_h (y_h - y_f) + \gamma_h \left( \frac{\partial y_h}{\partial t} - \frac{\partial y_f}{\partial t} \right) = s_p (y_p - y_h) + \gamma_p \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_h}{\partial t} \right) + p_a \quad (12)$$

$$m_f \frac{\partial^2 y_f}{\partial t^2} + s_f \cdot y_f + \gamma_f \frac{\partial y_f}{\partial t} = s_h (y_h - y_f) + \gamma_h \left( \frac{\partial y_h}{\partial t} - \frac{\partial y_f}{\partial t} \right) + p_s \quad (13)$$

판토그래프 모델의 등가질량의 변위, 속도 및 가속도에 대한 초기조건은 모두 제로로 한다.

위의 2절에서 유도된 가선 및 판토그래프의 편미분 운동방정식은 유한차분식으로 변환하고, 수치해석을 용이하게 하기 위해서 운동방정식의 2차 편미분항은 중앙차분(central difference), 1차 편미분항은 후진차분(backward difference)으로 전개한다. 그리고 임의의 시간과 위치에서 계산되어야 할 전차선 및 조가선의 변위와 판토그래프의 변위에 대해서 정리한다.

### 3. 가선 및 판토그래프의 상호작용 모델

#### 3.1 접촉력의 계산 과정

집전시스템의 해석에서 전차선과 판토그래프 집전판 사이에 작용하는 접촉력을 정확히 구하는 것이 중요하다. Fig. 4는 임의의 질점 사이에서 접촉력 계산을 위한 선형 보간법을 설명하고 있다. 만일 전차선과 판토그래프 집전판이 이선 상태가 아니라면 두 시스템의 변위는 같다고 가정할 수 있다. 그리고 전차선에 집중 분포되어 있는 질점 사이의 변위가 선형적이라고 가정한다면, 전차선 변위에 대한 선형 보간식 (14)가 성립하게 된다.[3]

$$Y^k = \frac{a y_i^k + b y_{i+1}^k}{(a + b)} \quad (14)$$

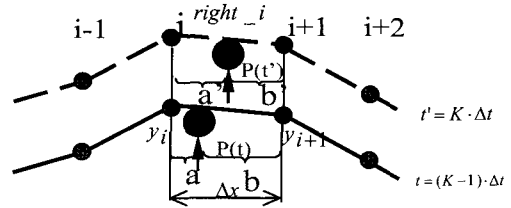


Fig. 4 Linear interpolation of contact force

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,

V는 판토그래프의 진행속도, k는 시간의 증분 회수 right\_i는 판토그래프가 어떤 임의의 두 질점 사이에 위치하는지를 나타낸다.

시간  $t = (k-1) \cdot \Delta t$ 에서 판토그래프가 질점사이에서 위치해 있을 경우, 접촉력 F(t)는 식(15)에 의해서 양쪽 질점사이의 거리에 따라서 분배된다.

$$F(t) = b \cdot p(t) / (\Delta t)^2, \text{ 만일 } i = \text{right\_}i-1 \\ = a \cdot p(t) / (\Delta t)^2, \text{ 만일 } i = \text{right\_}i \\ = 0, \text{ 그 외의 경우} \quad (15)$$

접촉력의 계산과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 우선 임의의 시간  $t = k\Delta t$ 에서 판토그래프와 전차선 사이에 접촉력 p가 작용하고 있다고 가정하면 전차선의 변위를 구할 수 있다. 또한 이선이 되지 않는다는 가정하에서 판토그래프의 변위를 구할 수 있다. 이렇게 구한 판토그래프의 변위를

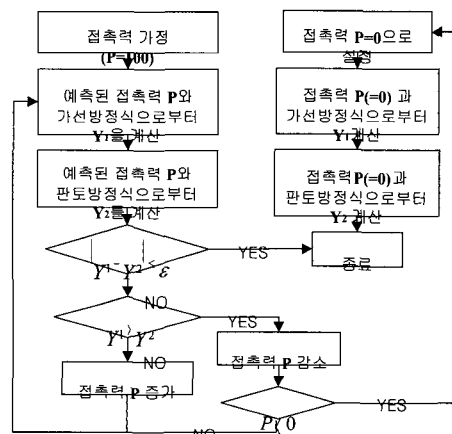
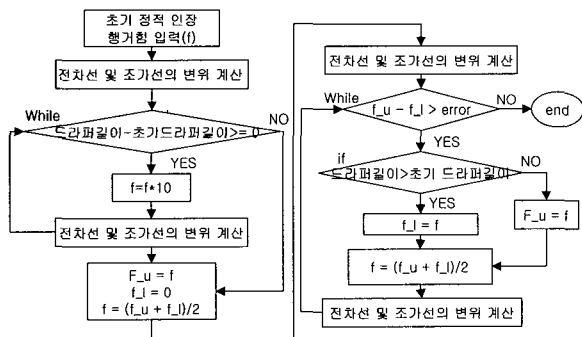


Fig. 5 Calculation procedure of a contact force

$Y_1$ 이라 하고 이와는 별개로 판토에 대한 운동방정식으로 부터 또 하나의 변위  $Y_2$ 를 구한다. 이때 두 값이 일치하면 처음 가정한 접촉력  $p$ 가 전차선에 관한 식과 판토그래프에 관한 식을 동시에 만족시켜 주므로, 그 순간에서의 접촉력이라고 할 수 있다. 그러나 가정한  $p$ 값이 실제보다 크거나 작으면  $Y_1$  및  $Y_2$  값이 일치하지 않을 것이다. 이 경우를 두 가지로 분류하여 생각하면, 첫째로  $Y_1$ 이  $Y_2$ 보다 작은 경우에는 전차선의 변위가 판토 변위보다 작다는 것을 의미하며, 이는 가정한 접촉력이 실제보다 작은 경우일 것이고 따라서  $P$  값을 크게 하여야 한다. 반대로  $Y_1$ 이  $Y_2$  보다 큰 경우에는 전차선과 판토가 떨어져 있는 상태를 나타내며, 이는 접촉력이 실제보다 크게 가정되었다는 결론을 내릴 수 있으며 이때는  $P$  값을 줄여야 할 것이다. 후자의 경우, 반복수행 계산 도중에 전차선에 관한 식과 판토에 관한 식을 동시에 만족시키는  $p$ 가 음수가 되는 경우가 있다. 물리적으로 생각해보면 접촉력이 음수가 될 수 없으므로, 이 경우는 접촉력을 0으로 하고 가선의 변위와 판토의 변위를 각각 구해야 한다. 실제로 구해보면 이때는 판토그래프의 변위  $Y_2$ 가 그 위치에서의 전차선의 변위  $Y_1$ 보다 작게 나타나 가선과 판토그래프가 서로 떨어져 있는 상태를 의미하게 된다.

**3.2 동적 드래퍼힘의 계산 과정**

가선계가 정적 평형상태에 있는 경우, 드래퍼에는 정적 인장 드래퍼힘이 작용하고 있다. 그러나 열차가 주행하는 경우, 전차선과 판토그래프 사이에는 동적 접촉력이 작용하게 되고, 그로 인해 전차선 처짐의 기울기가 변하면서 드래퍼에 작용하는 힘이 변한다.



**Fig. 6 Calculation procedure of dynamic dropper force**

결국 전차선과 조가선이 힘의 평형상태를 이루기 위해서 조가선이 상승하거나 하강하게 된다.

Fig. 6은 동적 드래퍼힘을 계산하는 순서도를 나타내고 있다. 먼저 정적 평형상태에서는 전차선 자중에 의해서 드래퍼가 인장힘을 받고 있으므로, 정적 드래퍼힘을 동적 드래퍼힘의 초기값으로 입력하고 조가선 및 전차선 변위를 구한다. 그리고 가선의 정적구조 계산에서 결정된 원래 드래퍼 길이와 비교하게 된다. 만일 임의의 시간에서의 드래퍼 길이가 정적 드래퍼 길이보다 크다면 반복수행법을 사용하여 정적 드래퍼 길이와 같아질 때까지 드래퍼힘을 증가시키고, 만일 그와 반대 상황이라면 원래 드래퍼 길이와 같아질 때까지 드래퍼힘을 감소시켜 드래퍼힘을 결정하게 된다.

**4. 수치 모의해석**

수치모의해석에서 사용되는 집전시스템의 기계적 특성 데이터는 TGV 단순 가선계 및 GPU 판토그래프 제원을 사용한다. Table 1 및 2는 TGV 단순 가선계 및 GPU 판토그래프의 입력 데이터이다[4].

**Table 1 Input data of simple catenary system**

	선밀도 (kg/m)	장력 (kN)	감쇠비	가고(m)	1.4
				공간 수	10
조가선	0.605	14.0	0.05	공간길이(m)	63
전차선	1.334	20.0	0.01	드래퍼수	9
드래퍼	0.108	-	-	드래퍼간격(m)	4.5,6.75
곡선 당 집금구	등가질량(kg)		0.9	사전이도량(m)	63/2000
	강성(N/m)		218	클램프질량(kg)	0.4
	감쇠계수(Ns/m)		0.23	질점 간격(m)	0.45

**Table 2 Input data of GPU pantograph**

	등가 질량 (kg)	스프링 상수 (N/m)	감쇠 상수 (Ns/m)	정적 압상력 (N)	공력 계수 (N/(Km/h) <sup>2</sup> )
집전판	8.1	9,000	6.0	-	-
중간지지부	8.0	1,200	0.0	-	0.00133
메인프레임	23.1	0.0	140	70	-

수치모의해석을 위한 프로그램 과정에서, 절대좌표에서 계산된 가선의 정적평형 상태의 변위 데이터는

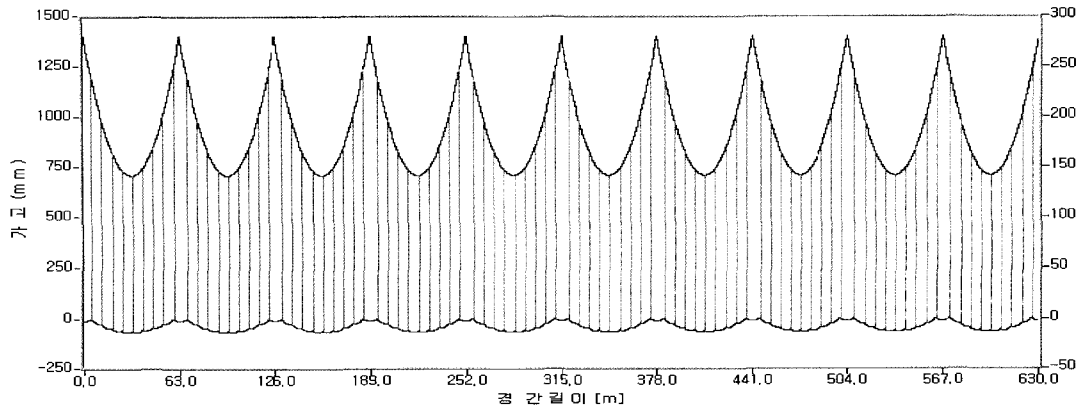


Fig. 7 Static structure of simple catenary system

상대좌표에서 유도된 가선 및 판토크래프의 동적 운동 방정식의 초기 입력 데이터로 사용하기 위하여 상대좌표 데이터로 변환된다. 동적 수치모의해석에서 상대좌표에서 계산되는 가선의 동적 변위는 정적평형 상태의 초기입력 변위와 더하여 절대 변위로 나타낸다.

수치 해석의 수렴성과 안정성을 위하여 질점 간격 및 적분 시간의 비, 즉  $\Delta x / \Delta t$ 는 가선의 파동전파속도의 70 % 이내가 되도록 선택되었다.

#### 4.1 정적 구조 해석 결과

단순 가선계의 정적구조 해석결과는 Fig. 7에 나타내었다. Table 3은 단순 가선계의 사전이도(Pre-sag), 정적 드라퍼힘, 드라퍼 길이에 대한 해석 결과를 보이고 있다. 가선의 구조설계에서 중요한 드라퍼 길이의 해석값은 TGV 자료의 설계값[5]과 비교를 하였고 거의 1.0 mm 이하의 오차로 정확히 계산되었다.

Table 3. Static analysis of simple catenary

드라퍼 위치 (m)	사전 이도 (mm)	정적 드라퍼힘 (N)	드라퍼 길이(계산) (mm)	드라퍼 길이[5] (mm)
4.5	0.0	149.5	1202.8	1203.0
11.25	13.8	81.9	1009.4	1010.0
18.0	23.6	81.9	871.2	872.0
24.75	29.5	81.9	788.3	789.0
31.5	31.5	81.9	760.6	761.0
38.25	29.5	81.9	788.3	789.0
45.0	23.6	81.9	871.2	872.0
51.75	13.8	81.9	1009.4	1010.0
58.5	0.0	149.5	1202.8	1203.0

#### 4.2 동적 해석 결과

개발된 동적 수치모의해석 프로그램을 이용하여 접촉력 및 전차선의 압상량을 계산하고 각각의 평균값, 표준편차를 구하였다. 또한 해석된 결과는 일본의 철도종합기술연구소에서 개발된 상용 프로그램 『가선도』 [6]의 해석결과와 비교하였다.

해석시간의 간격  $\Delta t$ 마다 접촉력을 계산하게 되면, 고주파수의 접촉력이 발생하게 된다. 그리고 고속용 판토크래프가 전차선에 가진하는 주요성분은 각각 약 1.0 Hz 및 15.0 Hz 근방의 경간 주파수와 드라퍼 주파수 성분이므로, 이와 같은 주요 주파수 성분만을 고려하여 접촉력을 20.0 Hz 저주파수 대역의 필터링을 한다. 또한 수치모의해석을 수행하는 전체 경간수는 10 경간이지만, 인류구간 양단을 고정하여 모델링 하였으므로, 반사파의 영향을 고려하여 중앙의 4 경간만

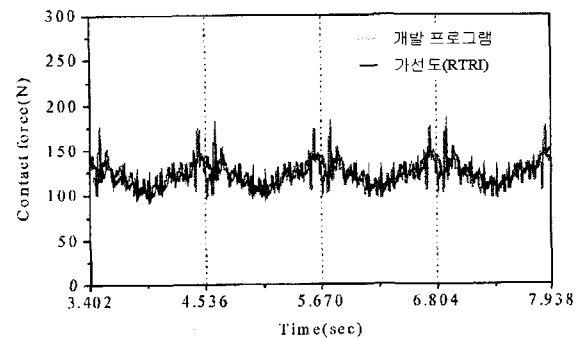


Fig. 8 Contact force between contact strip and contact wire(V=200 km/h)

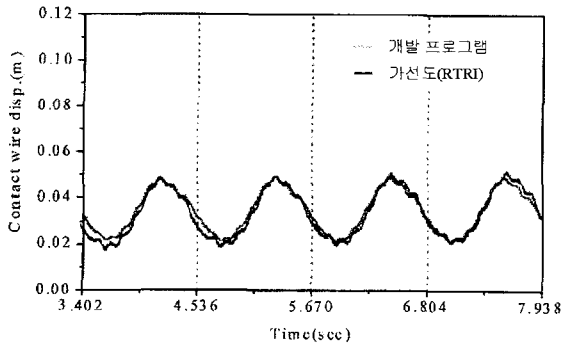


Fig. 9 Uplift displacements of contact wire(V=200 km/h)

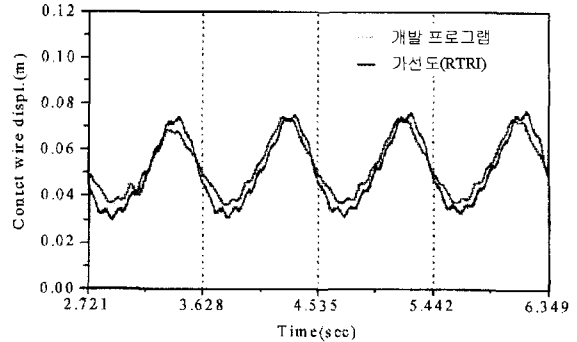


Fig. 11 Uplift displacements of contact wire(V=250 km/h)

을 해석 결과로 나타내었다.

Fig. 8 및 9는 차량속도  $V = 200 \text{ km/h}$ 일 경우에 대해서 접촉력과 전차선의 변위를 나타내고 있다. 수직 접선은 경간 지지점을 표시하고 있다.

접촉력의 해석 결과, 경간 지지점 부근에서 최대 접촉력이 발생하고 경간 중앙부에서 최소 접촉력이 발생하며, 개발 프로그램과 가선도의 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 전차선의 압상변위의 해석 결과, 가선도의 해석결과가 약 5mm정도 더 크게 나타나지만 비교적 잘 일치하고 있으며, 경간의 2/3 지점에서 최대 압상변위가 발생한다.

Fig. 10 및 11은 차량속도  $V = 250 \text{ km/h}$ 일 경우에 대해서 접촉력과 전차선의 변위를 나타내고 있다. 접촉력의 경우, 개발 프로그램과 가선도가 비교적 경향은 일치하나 가선도 해석결과가 경간 지지점 부근에서 접촉력 피크가 크게 발생하고 있다. 전차선 압상변위의 경우, 가선도 해석값이

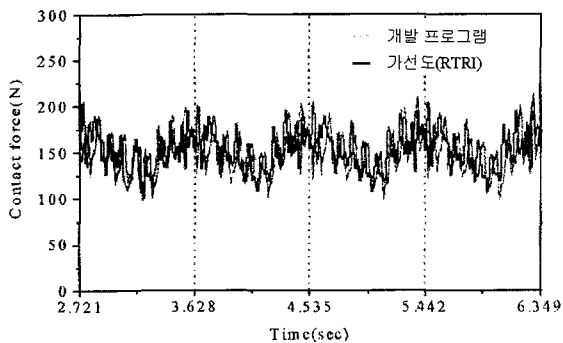


Fig. 10 Contact force between contact strip and contact wire(V=250 km/h)

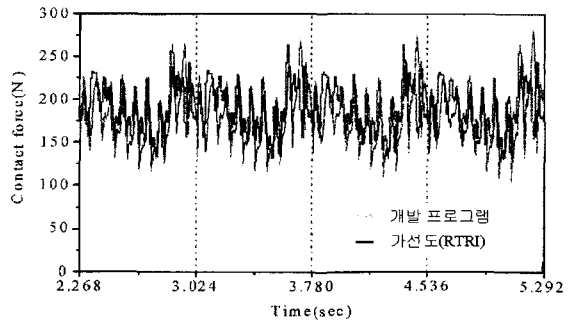


Fig. 12 Contact force between contact strip and contact wire(V=300 km/h)

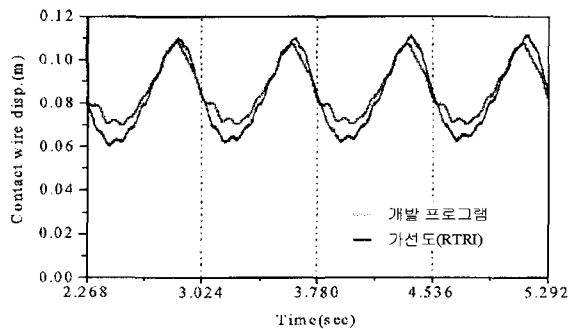


Fig. 13 Uplift displacements of contact wire(V=300 km/h)

최대 10 mm 정도로 더 크게 나타나고 있으나 전차선 변위의 경향은 비교적 일치한다.

Fig. 12 및 13은 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 경

간의 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.

Table 4 및 5는 개발 프로그램과 일본 철도총합기술연구소에서 개발된 상용 프로그램 『가선도』를 이용하여 차량속도 200, 250 및 300 km/h에 대한 평균 접촉력, 전차선의 평균 압상변위 및 각각의 표준편차의 해석결과를 정리한 것이다. 차량속도 200, 250 및 300 km/h에서, 가선도에 대한 개발 프로그램의 평균 접촉력은 각각 99%, 97% 및 95%으로 비교적 잘 일치하며, 접촉력의 표준편차는 91%, 84% 및 76%로 속도가 증가할수록 차이가 나고 있다. 또한 가선도에 대한 개발 프로그램의 전차선의 평균 압상변위는 각각 97%, 94% 및 94%로 비교적 잘 일치하며, 평균 압상변위의 표준편차는 각각 100%, 75% 및 75%로 속도가 증가할수록 차이가 발생하고 있다.

**Table 4 Analysis results of contact force**

차량속도 (km/h)	비교 성능	개발 프로그램	가선도 프로그램	개발/가선도
200	평균접촉력(N)	121.5	122.6	0.99
	표준편차(N)	14.7	16.1	0.91
250	평균접촉력(N)	147.9	152.7	0.97
	표준편차(N)	22.9	27.4	0.84
300	평균접촉력(N)	180.2	189.3	0.95
	표준편차(N)	29.4	38.6	0.76

**Table 5 Analysis results of uplift displacement of contact wire**

차량속도 (km/h)	비교 성능	자체개발 프로그램	가선도 프로그램	개발/가선도
200	평균변위(m)	0.032	0.033	0.97
	표준편차(m)	0.009	0.009	1.00
250	평균변위(m)	0.048	0.051	0.94
	표준편차(m)	0.009	0.013	0.75
300	평균변위(m)	0.073	0.078	0.94
	표준편차(m)	0.012	0.016	0.75

**5. 결론**

고속 집전계의 동가 모델에 대한 수치모의해석 프로

그램을 개발하고 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위해서 일본의 철도총합기술연구소(RTRI)에서 개발된 상용 프로그램인 가선도와 해석 결과를 비교한 결과는 다음과 같다.

개발된 프로그램을 이용하여 차량속도 200, 250 및 300 km/h에 대해서 접촉력 및 전차선의 압상변위에 대한 수치모의해석을 수행한 결과, 접촉력 및 전차선의 압상 변위의 동적 거동은 가선도와 비교적 유사하였다. 그러나 차량속도가 증가하면서 접촉력 및 전차선의 압상 변위는 서로 차이가 발생하고 있다.

이와 같이 운전속도가 증가함에 따라서 개발 프로그램과 가선도를 이용하여 해석한 접촉력 및 전차선의 압상 변위 사이에 차이가 발생하는 원인은 가선도 프로그램의 집전계 모델링 및 수치해석 알고리즘에 대해서 자세히 기술된 문헌이 없어서 검증할 수 없었다.

**참고문헌**

1. Dr.-Ing, Klaus Becker etc(1995), "Systematic Dvelopment of a High-speed Overhead Contact Line," Railway Technical Review No. 3-4, pp. 3-11
2. G. Poetsch, J. Evans, R. Meisinger, W. Kotum, W. Baldauf, A. Veitl and J. Wallaschek(1997), "Pantograph/Catenary Dynamics and Control," Vehicle System Dynamic, 28.
3. Y. Fujii, K.Manabe, "Computer Simulaion for Dynamics of Overhead Catenary-Pantograph System," Computers in Railways, pp.51-59
4. 허 신, 경진호, 송달호 (1998), "한국형 고속전철 집전 시스템의 동적설계에 관한 연구," 한국철도학회 추계 학술대회논문집, pp. 445~451.
5. Korea TGV Consortium(1995), "Dropper Lenght Table with covered Messenger and reduced system Height without Stitch Wire," WBS No. K621-A02A02 -E1251-CB-00-X-T-001
6. 철도총합기술연구소(1994), "가선도s-1 Ver.1 매뉴얼"

**후기**

본 연구는 1999년도 건설교통부/과학기술부/산업자원부 선도기술사업인 "고속전철 기술개발사업"의 일환으로 수행된 연구결과와 일부입니다.