

# 경량전철 집전장치의 접촉압력과 이선율에 대한 연구

## A Study on the contact pressure and contact keep ratio of the collector gear of AGT

이병택\*  
Lee, Byung-Taek

임원식\*  
Lim, Won-Sik

### ABSTRACT

The rubber tire type AGT vehicles had been developed in a few years. And testing are finished on the test track. The extremely differ from heavy train with iron wheels are current collect type and wheel's characteristic. Analysis the current collect gear dynamic with vehicle dynamic and reduce the exchange rate shoes of current collect gear's.

### 1. 서론

AGT 고무차량은 수년간의 국내기술의 개발로 이미 국내에 시제차량이 완성되어 있으며, 시험선로에서 시험 운영을 완료하였다.

고무차량 경량전철 차량과 기존 도시전철의 권선차량 차량과의 가장 큰 차이점은 차량이 고무차량이라는 점과 집전장치에 있을 수 있다.

AGT 고무차량의 움직임, 급전선의 변형량과 집전기를 이루고 있는 각 부재 형상의 변화에 따른 기계적인 움직임을 예측하여 이선이 생기지 않는 범위 내에서 집전장치의 접촉력을 줄여 집전슈의 마모에 따른 교체주기를 최대화하는데 목적이 있다.

### 2. 집전기의 동적 모델링

본 절에서는 집전기의 동적 모델링에 대해 고찰한다. 이를 위하여 Fig.1을 고려한다. Fig.1에서와 같이 집전기는 5개의 부재와 하나의 스프링으로 구성된다고 가정한다. 집전기는 직선운동을 하는 차체에 고정되어 있고 부재 5의 끝단에서 가이드와의 접촉에 따른 마찰이 일어난다고 생각한다. 지금부터 이상의 5개의 부재에 대한 동적 모델은 구성하기로 한다.

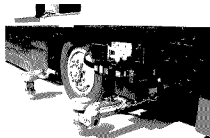
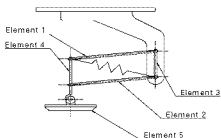


Fig.1 Vector diagram view and installed picture of Collector-Gear

#### 2.1 부재 1의 동적 모델링

$$m_1 a_x = F_x - F_1 - F_{S1} \quad (2.1)$$

$$m_1 a_y = F_y + F_{S2} - F_2 \quad (2.2)$$

$$I \ddot{\theta} = \left( \frac{b_0}{2} \right) (F_{S2} - F_2 - F_y) \cos \theta + \left( \frac{b_0}{2} \right) (F_1 - F_x - F_{S1}) \sin \theta \quad (2.3)$$

\* 서울산업대학교 부교수, 정희원

\*\* 서울산업대학교 석사과정, 학생회원

위 식에서  $a_x, a_y$ 는 질량 중심점의 가속도를 나타낸 것으로서 각각  $\ddot{x}, \ddot{y}$ 를 의미한다.  $x, y$ 는 Fig.2에 나타난 바와 같이 회전각도  $\theta$ 와 일정한 구속관계를 가진다. 차체를 기준으로 측정한 부재 1의 고정점( $x_0, y_0$ )을 고려하여  $x, y, \theta$ 들의 관계를 고려하면 다음의 Fig.3과 같다.

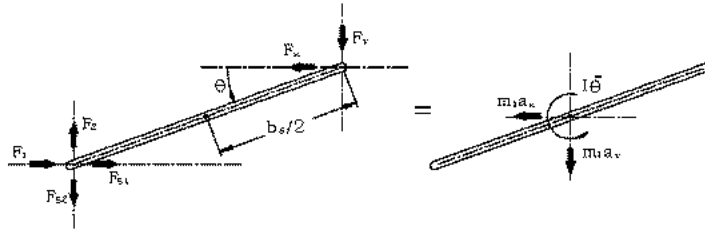


Fig.2. Schematic diagram for the modeling of element 1.

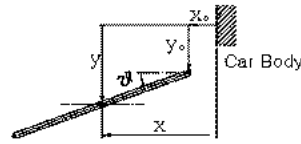


Fig.3. Schematic diagram for the constraint equation of variables

$$x = x_0 + \left(\frac{b_s}{2}\right) \cos\theta \quad (2.4)$$

$$y = y_0 + \left(\frac{b_s}{2}\right) \sin\theta \quad (2.5)$$

## 2.2 부재 2의 동적 모델링

부재 2는 부재 1과 동일한 형상이라고 가정한다. 부재 1과 부재 2는 기구적인 구조 특성에 의해 평행 운동을 하므로 부재 2의 질량 중심의 가속도는 부재 1의 질량 중심의 가속도와 동일하다고 가정할 수 있다. 즉, 두 부재의 가속도는  $a_x, a_y$ 로 동일하다. 부재 2의 운동방정식을 정리하면 다음과 같다.

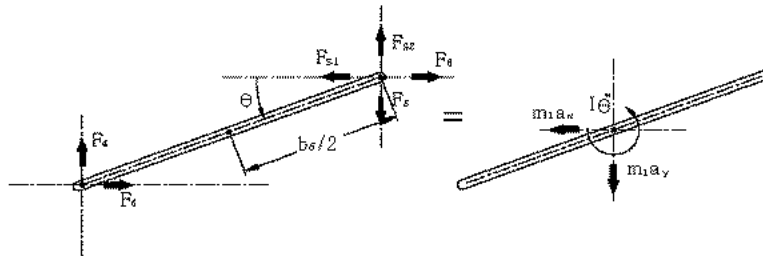


Fig.4. Schematic diagram for the modeling of element 2.

$$m_1 a_x = -F_3 - F_6 + F_{S1} \quad (2.6)$$

$$m_1 a_y = -F_4 + F_5 - F_{S2} \quad (2.7)$$

$$I_G \ddot{\theta} = (F_5 - F_6 - F_4) \left(\frac{b_s}{2}\right) \cos\theta + (F_{S1} + F_3 - F_7) \left(\frac{b_s}{2}\right) \sin\theta \quad (2.8)$$

## 2.3 부재 3의 동적 모델링

부재 3번은 차체에 고정된 부재로서 부재 1번과 2번을 지지하고 있다. 부재 1번과 2번으로 작용되는 힘들을 표시하면 Fig.5와 같다. 이들 4종류의 힘이 차체에 작용하지만, 차체의 관성이 매우 크므로 이들 힘에 의한 운동의 영향도는 없다고 가정한다.

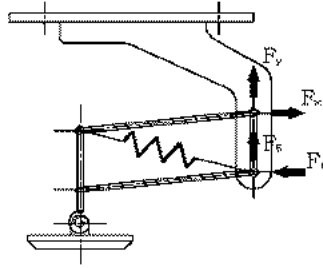


Fig.5. Schematic diagram for the modeling of element 3.

## 2.4 부재 4의 동적 모델링

부재 4번은 회전 운동은 없으며 병진 운동만 발생한다고 가정할 수 있다. 질량 중심점의 가속도는 부재 1번과 부재 2번의 질량 중심점의 가속도와 비슷한 형태를 가지나 차체에 대한 상대적인 가속도의 값이 무배인 특성을 가진다. 이러한 특성을 고려하여 운동방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$m_4 a_x = m_4 \{ \ddot{x}_f - b_3 (\ddot{\theta} \sin \theta + (\dot{\theta})^2 \cos \theta) \} = F_1 + F_3 - F_7 \quad (2.9)$$

$$m_4 a_y = m_4 \{ \ddot{y}_f + b_3 (\ddot{\theta} \cos \theta - (\dot{\theta})^2 \sin \theta) \} = F_2 + F_4 + F_8 \quad (2.10)$$

$$k_f \phi + b_3 F_7 + b_4 F_8 = 0 \quad (2.11)$$

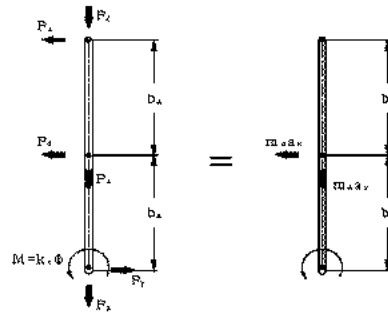


Fig.6. Schematic diagram for the modeling of element 4.

## 2.5 부재 5의 동적 모델링

부재 5번은 부재 4번의 끝부분에 장착되어 병진운동과 회전 운동이 동시에 나타난다. 이에 대한 동적 모델을 위해 Fig.7을 고려한다.

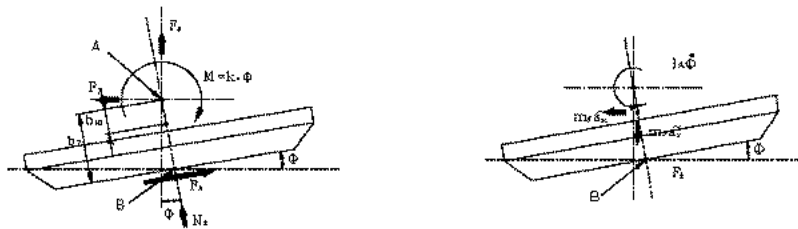


Fig.7. Schematic diagram for the modeling of element 5.

$$m_5 \bar{a}_x = F_1 + N_f \sin \phi - F_f \cos \phi \quad (2.12)$$

$$m_5 \bar{a}_y = -F_2 - N_f \cos \phi - F_f \sin \phi \quad (2.13)$$

$$I_A \ddot{\phi} = -k_f \phi + F_f \cdot b_1 \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} \ddot{\bar{x}}_x = \ddot{x}_{C,G} = \ddot{x}_0 - b_3(\ddot{\theta} \sin \theta + (\dot{\theta})^2 \cos \theta) - b_{10}[\ddot{\phi} \cos \phi - (\dot{\phi})^2 \sin \phi] \\ \ddot{\bar{y}}_y = \ddot{y}_{C,G} = \ddot{y}_0 + b_2(\ddot{\theta} \cos \theta - (\dot{\theta})^2 \sin \theta) - b_{10}[\ddot{\phi} \sin \phi + (\dot{\phi})^2 \cos \phi] \end{cases}$$

위의 식들에서  $k_t$ 는 torsional stiffness로서 Fig.8의 축방향 스프링  $k_s$  2개가 병렬로 연결된 구조라 할 수 있다.

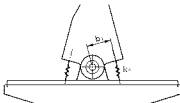


Fig.8 Schematic diagram for the modeling of torsional stiffness

$$k_t = 2b_3k_s \quad (2.15)$$

또한, 짐전기와 가이드와의 접촉면에서 작용하는 마찰력은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$F_f = \mu N_f \quad (\mu \text{ is dynamic friction coefficient}) \quad (2.16)$$

## 2.6 가진력에 대한 모델링

짐전기의 기준 위치를 정하고 그 기준 위치에서의 변동에 대한 가동을 분석하기로 한다. 짐전기의 기준 위치는 차체와 가이드가 평행한 직선으로 놓여있고 짐전류의 회전각  $\phi$ 이 0이며, 부재들 사이의 스프링이 정해진 기준 각도 ( $= \theta_0$ )로 변형되어 있는 경우로 정의하기로 한다. 이에 대한 그림이 Fig.9 에 나타나 있다.

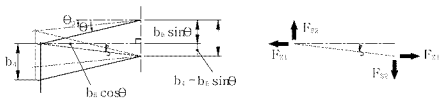


Fig.9 Schematic view for the initial state of system

Fig.9의 관계를 고려하면 링크사이에서 존재하는 인장 스프링의 변형량과 스프링력 작용 방향은 다음과 같이 계산된다.

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{b_1 - b_2 \sin \theta}{b_2 \cos \theta} \right), \quad \zeta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{b_1 - b_2 \sin \theta_0}{b_2 \cos \theta_0} \right) \quad (2.17)$$

$$F_{S1} = F_S \cos \zeta, \quad F_{S2} = F_S \sin \zeta \quad (2.18)$$

$$\Delta l = \frac{b_2 \cos \theta}{\cos \zeta} - \frac{b_2 \cos \theta_0}{\cos \zeta_0} \quad (2.19)$$

기준 위치 ( $\theta = \theta_0, \phi = 0$ )인 상태에서 부재 5의 B점을 고려한다. B점은 가이드와 인체나 짐축을 유지한다고 가정하며, 짐축을 유지하기 위한 normal force  $N_f$ 가 작용한다. Fig.7로부터 이러한 B점의 좌표값은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{cases} x_B = x_A - b_7 \sin \phi = x_0 + b_5 \cos \theta - b_7 \sin \phi \\ y_B = y_A + b_7 \cos \phi = y_0 + b_5 \sin \theta + (b_4 + b_6) + b_7 \cos \phi \end{cases} \quad (2.20)$$

기울 위치  $(\theta = \theta_0, \phi = 0)$ 인 상태에서 B점의 값은 다음과 같다.  
또한 (2.20)의 식을 미분하면 다음과 같은 가속도의 식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \ddot{x}_B = \ddot{x}_0 - b_5 \{ \ddot{\theta} \sin \theta + (\dot{\theta})^2 \cos \theta \} - b_7 \{ \ddot{\phi} \cos \phi - (\dot{\phi})^2 \sin \phi \} \\ \ddot{y}_B = \ddot{y}_0 + b_5 \{ \ddot{\theta} \cos \theta - (\dot{\theta})^2 \sin \theta \} - b_7 \{ \ddot{\phi} \sin \phi + (\dot{\phi})^2 \cos \phi \} \end{cases} \quad (2.21)$$

### 2.7 차체와 가이드 운동에 대한 모델링

차체의 직선 방향의 운동은 등속도로 가정하며  $(V_0 = dx_0/dt)$ , 쉘 방향 운동은 다양한 주파수 성분을 가진다고 가정한다.

$$V_0 = \frac{dx_0}{dt} = \text{constant}, \quad y_0(t) = \sum_{i=1}^N Y_{0,i} \sin(\omega_{\kappa,i} t) \quad (2.22)$$

집진기와 가이드와의 접촉점인 B점의 y 방향 변위는 가이드의 영상 데이터에 의해 다음과 같이 입력된다고 가정한다. 여기서  $\lambda_i$ 는 i 번째 파장을 뜻한다.  $Y_{B,i}$ 는 i 번째 진폭을 의미한다.

$$y_B(t) = y_{B,0} + \sum_{i=1}^N Y_{B,i} \sin\left(\frac{2\pi V_0}{\lambda_{B,i}} t\right) \quad (2.23)$$

### 3. 결과 및 검토

지금까지 고려한 운동방정식을 각 식의 활용 목적을 감안하여 정리하면 다음과 같다. 즉, 시스템의 운동방정식에서 독립적인 운동변수는  $\theta, \phi$ 의 2개만 할 수 있다. 이를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} b_5 \cos \theta & -b_7 \sin \phi \\ 2I + b_5 \left( \frac{m_1}{2} + m_4 + m_5 \right) & \left( \frac{-b_7}{\mu b_7} \right) \left\{ I_A \cos(\phi - \theta) + \nu (I_A - b_7 b_{16} m_5) \sin(\phi - \theta) \right\} \end{cases} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{cases} \ddot{y}_B - \ddot{y}_0 + b_5 (\dot{\theta})^2 \sin \theta + b_7 (\dot{\phi})^2 \cos \phi \\ b_5 (m_1 - m_4 - m_5) (\ddot{x}_0 \sin \theta - \ddot{y}_0 \cos \theta) - b_5 \left( \frac{k_2 \phi}{\mu b_7} - b_{16} m_5 (\dot{\phi})^2 \right) \cos(\phi - \theta) - \frac{b_5 k_2 \phi}{b_7} \sin(\phi - \theta) + b_5 F_s \sin(\theta - \phi) \end{cases} \quad (2.48)$$

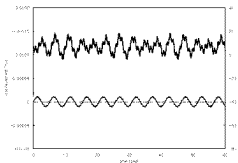


Fig.1 Simulation result - displacement and angle

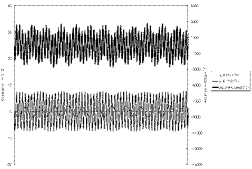


Fig.2 Simulation result - Acceleration

위의 해석 결과는 집전기의 변위와 차량의 변위에 의해 발생하는 집전기의 진동 현상을 해석한 결과이다. 첫 번째는 변위의 결과를 나타내고 있고, 두 번째는 가속도를 나타내고 있다. 전반적인 결과로부터 본 연구에서 제시한 해석 방법이 타당하다고 볼 수 있다. 차량과 집전 레일의 변위 진동에 의해 집전기 운동체의 진동이 야기되며 양단의 가진 주파수가 그대로 관측되고 있다.

<각 식에 사용한 파라미터>

- $m_1$  : element 1, 2의 중량 0.244kg                       $m_4$  : element 4의 중량 0.616kg  
 $m_5$  : element 5의 중량 2.133kg  
 $b_4$  : element 1와 2의 이격거리 70mm               $b_5$  : element 1, 2의 길이 200mm  
 $b_6$  : element 2와 2의 회전중심점 거리 40mm  
 $b_7$  : element 2의 회전중심점에서 B점까지의 거리 55.5mm  
 $b_{10}$  : element 2의 회전중심점에서 무게중심의 거리 35mm  
 $I$  :  $\frac{m_1(b_3)^2}{12}$                                        $N_f$  : B점에서의 Normal Force  
 $V_o = \dot{x}_o$  : 70km                                       $\lambda_{B,j}$  : 집전기와 급전선 접촉점의 주파수  
 $\lambda_{g,j}$  : 차체의 주파수

#### 4. 결론

집전기 각각의 부재에 대한 다이나믹 해석을 하였으며, 집전시 영향을 줄 수 있는 외력 및 부재에 대한 검토를 하였다. 이를 통하여 집전시 영향을 주는 가장 큰 요소는 급전선이며, 급전선의 설치시 고려하여야 할 설치 공차에 대한 영향을 예측할 수 있게 되었다. 이선술에 대한 기준은 차량이 가지고 있는 전장품에 따라 달라질 수 있으나, 급전선의 주어진 설치 공차내에서 집전장치의 접촉압력변화에 따른 이선술의 변화를 예측하여 집전장치의 접촉압력을 최소화 하여 집전시 발생하는 집전장치의 마모를 줄일 수 있다.

#### 참고문헌

1. Hitoshi Tsunashima, Yozo Fukumoto "Computer Simulation of Lateral Guidance System for Automated Guideway Transit Vehicles", Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 37, No. 4, pp49-52, 1987.
2. Yozo Fukumoto "Computer Simulation and Running Test for Restrained Guidance System for KRT Vehicles", Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 37, No. 1, pp79-82, 1987.
3. 송창민, 이우식 "Dynamic Characteristics of Automated Guideway Transit(AGT) Vehicles", 한국철도학회논문지, 제4권, 제1호, 2001.
4. 한국철도기술연구원 "경량전철시스템 기술개발사업 - 6차년도 연구 결과 보고서(분야 : 경량전철 차량시스템 개발)" 2004.
5. 한국철도기술연구원 "경량전철 급전/집전시스템 기술개발" 1999.
5. 김기봉, 김철우, 송재필, 이안호 "Modeling of an AGT Vehicle for Dynamic Responsible Analysis"