

유한 요소 해석 기법을 이용한 고속 철도 차량의 집전 성능 해석

정성필* · 박태원*† · 김영국** · 박찬경** · 백진성**

* 아주대학교 기계공학부, ** 한국철도기술연구원

Analysis of the Current-Collection Performance of a High-Speed Train Using Finite Element Analysis Method

Sung Pil Jung*, Tae Won Park*†, Young Guk Kim**, Chan Kyoung Park** and Jin Sung Paik**

* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.,

** Korea Railroad Research Institute

(Received January 18, 2011 ; Revised April 11, 2011 ; Accepted April 12, 2011)

Key Words : Dynamic Simulation Model(동역학 해석 모델), Current Collection Performance(집전성능), High Speed Train(고속 열차), Pantograph(판토히레프), Catenary(가선계)

초록: 본 논문에서는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 SAMCEF 를 이용하여 고속 철도 차량의 집전성능 을 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하였다. 3 자유도 스프링-댐퍼-질량의 판토히레프 모델을 생성하였고, 실제 시스템과의 리셉턴스를 비교함으로써 신뢰성을 검증하였다. UIC 799 OR 기준에서 제시한 가선계의 이론적 파동 전파 속도와 가선계 유한 요소 해석 모델에서 측정된 파동 전파 속도를 비교 하였다. 드로퍼의 길이를 조절하여 전차선의 중력에 의한 초기 처짐 현상을 구현하였다. 가선계와 판토히레프를 접촉 요소를 이용하여 연성하였으며, 판토히레프가 300 km/h 및 370 km/h 로 주행할 때의 접촉력 변화를 도출하였다. 접촉력의 평균, 표준편차, 최대 및 최소값 등을 분석함으로써 본 논문에서 제시한 해석모델의 유효성을 검증하였다.

Abstract: In this study, a simulation model to estimate the current-collection performance of a high-speed train was developed by using a commercial finite element analysis software, SAMCEF. A three-dimensional springdampermass model of a pantograph was created, and its reliability was validated by comparing the receptance of the model to that of the actual pantograph. The wave propagation speed of the catenary model was compared with the analytical wave propagation speed of the catenary system presented in the UIC 799 OR standard. The length of the droppers was controlled, and the pre-sag of the contact wire due to gravity was considered. The catenary and the pantograph were connected by using a contact element, and the contact force variation when the pantograph was moved at velocities of 300 km/h and 370 km/h was obtained. The average, standard deviation, maximum, and minimum values of the contact force were analyzed, and the effectiveness of the developed simulation model was examined.

1. 서 론

전기로 구동되는 고속철도차량은 열차의 지붕에 탑재된 판토히레프(Pantograph)가 전차선(Contact wire)과 미끄럼 접촉하면서 전기에너지를 공급받는다. 판토히레프의 집전성능은 고속열차의 운행 안정성과 최고속도를 결정짓는 중요한 요소로써, 운행속도가 증가할 경우 판토히레프와 전차선 사

이의 접촉력의 변화가 커지게 되고 이선 현상이 나타나 전력공급 장애, 아크발생, 전차선 및 습동판의 이상 마모 등이 발생하게 된다.⁽¹⁾ 때문에 유럽 규격 EN 50119:2001⁽²⁾에서는 전차선로를 설계할 때 반드시 판토히레프와 전차선로 사이의 동적 접촉력 변화를 수치 시뮬레이션을 이용하여 분석할 것을 요구하고 있다.⁽³⁾

현재까지 유한 요소 해석 기법을 이용하여 기법을 이용하여 판토히레프의 집전성능을 예측하기 위한 많은 연구가 진행되었다. Wu⁽⁴⁾는 접촉선의 강성행렬과 드로퍼의 강성행렬을 조합하여 전체 가선시스템의 강성 행렬을 조합하였고, 1 자유도의

† Corresponding Author, park@ajou.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

선형 판토틀래프 모델을 이용하여 시간에 따른 접촉력 변화를 계산하였다. Seo^(5,6)는 유한요소법에 기초한 ANCF 요소⁽⁷⁾를 이용하여 가선계를 모델링하였고, 전차선과 판토틀래프간의 연결을 모사하기 위한 미끄럼 조인트(Sliding joint)를 개발하여 모델에 적용함으로써 보다 구체적인 판토틀래프와 전차선간의 접촉력 변화를 도출하였다. Rauter⁽⁸⁾는 판토틀래프에 대한 다물체 동역학 모델과 가선계에 대한 유한 요소 모델을 각기 생성하였고, 두 가지 해석 결과를 매 적분 시간마다 교환하는 방식으로 두 시스템간 상호 연성 작용을 계산하였다. Pombo⁽⁹⁾는 Rauter 의 해석 모델에 비선형 공기 항력 모델을 추가하여 해석을 수행함으로써 판토틀래프-가선계 모델을 구체화 시켰다. Cho^(10,11)는 유한 요소법을 이용하여 가선계 시스템에 대한 수치 모델을 개발하였고, 동역학 해석을 통해 빠른 속도로 이동하는 판토틀래프에 의한 가선계의 파동전과 특성(Wave propagation characteristic) 및 집전성능을 분석하였다.

본 논문에서는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 SAMCEF⁽¹²⁾를 이용하여 판토틀래프와 가선계의 동적 연성 작용에 의한 접촉력 변화를 시뮬레이션 하였다. 앞서 언급한 선행 연구에서는 판토틀래프-가선 시스템에 대한 전용 해석 모델을 개발하여 특성을 분석하였기 때문에, 이 모델을 대차시스템 및 휠/레일 접촉을 포함한 철도차량 전체 해석 모델로 확장시키기에는 어려움이 있다. 본 연구에서 사용한 SAMCEF 는 유한 요소 기반의 다물체 동역학 해석 프로그램으로써, 강체 및 유연체 해석은 물론 접촉(Contact), 조인트(Joint) 등 여러가지 구속 요소를 제공할 뿐만 아니라 휠/레일 접촉모듈이 탑재되어 있기 때문에 교량, 궤도를 포함한 전체 철도 차량의 동적 특성을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 철도 차량 동역학 해석 모델을 개발하기 위한 첫번째 단계로, 가선계를 포함한 판토틀래프의 집전성능을 해석할 수 있는 수치 모델을 개발하는 것에 목표를 둔다. 3 자유도 스프링-댐퍼-질량 모델을 이용하여 판토틀래프를 대체하였고, 중력에 의한 전차선 초기 처짐(Pre-sag)을 고려한 상태에서 판토틀래프가 300 km/h 및 370 km/h 로 주행할 때의 접촉력 변동을 분석하였다.

2. 판토틀래프 해석 모델

2.1 판토틀래프 모델

본 논문에서 대상으로 하는 고속 철도용 판토틀래프는 Fig. 1 과 같이 전차선과의 접촉이 발생하는 팬

헤드(Pan head), 어퍼 암(Upper arm), 로우 암(Low arm) 및 지지 프레임(Base frame)으로 구성되어 있다. 판토틀래프의 저주파영역에서의 수직방향 움직임이 관심의 대상일 경우, 복잡한 형상의 판토틀래프를 3 자유도의 간단한 질량-스프링-댐퍼 모델로 대체할 수 있다.^(3,13) 본 논문에서는 판토틀래프의 특성을 나타내기 위한 해석 모델로써 Fig. 2 와 같이 3 자유도 질점 모델 (3 DOF lumped mass model)을 이용하였다.

Fig. 2 에서 m 은 질량, k 는 스프링 강성, c 는 댐핑 계수, F_c 는 접촉력, F_s 는 정적 압상력, y 는 각 질량의 움직임을 나타내기 위한 일반 좌표계이다. 뉴턴의 제 2 법칙에 따라 유도한 3 자유도 질점 모델의 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & m_1 \ddot{y}_1 + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 (y_1 - y_2) + F_c = 0 \\
 & m_2 \ddot{y}_2 - c_1 \dot{y}_1 + (c_1 + c_2) \dot{y}_2 - c_2 \dot{y}_3 - k_1 y_1 \\
 & \quad + (k_1 + k_2) y_2 - k_2 y_3 = 0 \\
 & m_3 \ddot{y}_3 - c_2 \dot{y}_2 + (c_2 + c_3) \dot{y}_3 - k_2 y_2 + (k_2 + k_3) y_3 \\
 & \quad - F_s = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

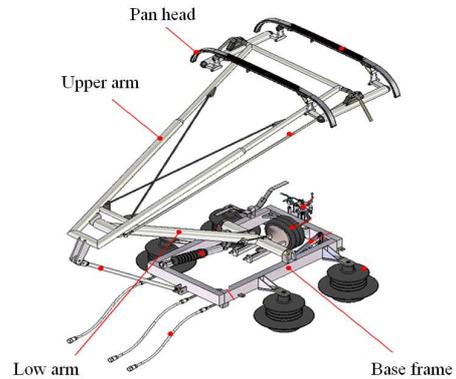


Fig. 1 Pantograph for a high speed train

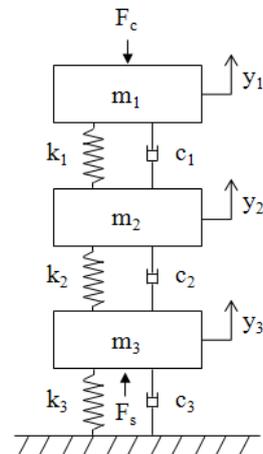


Fig. 2 3 DOF lumped mass model of a pantograph

식 (1)을 라플라스 변환하면 식 (2)가 유도된다.

$$\begin{aligned}
 & \bullet (m_1s^2 + c_1s + k_1)Y_1(s) - (c_1s + k_1)Y_2(s) = -F_c(s) \\
 & \bullet -(c_1s + k_1)Y_1(s) + \{m_2s^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)\} \\
 & \quad Y_2(s) - (c_2s - k_2)Y_3(s) = 0 \\
 & \bullet -(c_2s + k_2)Y_2(s) + \{m_3s^2 + (c_2 + c_3)s + (k_2 + k_3)\} \\
 & \quad Y_3(s) = F_s(s)
 \end{aligned} \tag{2}$$

판토크래프와 같이 저 주파수 범위의 진동에 관심이 있는 시스템의 동적 응답 특성을 알아보기 위해 리셉턴스(Receptance)⁽¹⁴⁾를 많이 활용한다. 리셉턴스는 시스템에 입력되는 가진 힘에 대한 변위 응답의 비로써, 시스템에 무작위 가진(Random excitation) 또는 주기 가진(Periodic excitation)을 가했을 때 나타나는 변위를 측정하여 리셉턴스를 구함으로써 시스템의 최대 진폭 진동수를 추정할 수 있다. 식 (2)에서 F_s 는 정적 압상력으로써 시스템의 동적 진동 특성에는 영향을 끼치지 않기 때문에 $F_s=0$ 이라고 하면, 3자유도 판토크래프 질점 모델의 리셉턴스(R_i)는 식 (3)과 같이 유도 된다.

$$R_1(s) = -\frac{Y_1(s)}{F_c(s)} = \frac{CE - D^2}{ACE - AD^2 - EB^2}$$

where

$$\begin{aligned}
 A &= m_1s^2 + c_1s + k_1 \\
 B &= c_1s + k_1 \\
 C &= m_2s^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2) \\
 D &= c_2s + k_2 \\
 E &= m_3s^2 + (c_2 + c_3)s + (k_2 + k_3)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)에서 s 대신 $j\omega$ 를 대입하면 주파수에 따른 리셉턴스 선도를 구할 수 있다.

2.2 판토크래프 추종 성능 실험

철도 차량 주행 중 가선의 진동, 전차선 높이 변화, 마모 및 차량 동요 등에 의해 판토크래프는 수직방향 진동이 발생한다. 이러한 진동은 접촉력 변동을 야기시키고, 접촉력의 크기가 '0'이하가 될 경우 이선이 발생하게 된다.⁽¹⁵⁾ 이러한 판토크래프의 수직방향 진동특성은 추종 성능 시험을 통해 확인할 수 있다. Fig. 3은 추종 성능 시험 환경을 보여준다. 판토크래프를 상승시켜 팬 헤드를 가진기에 접촉시킨다. 가진기에서는 주파수 및 진폭의 크기를 달리하며 정현파의 강제 변위를 발생시킨다. 이때 가진기와 팬헤드 사이에 장착된 Load cell (1)에서는 가진력을 측정하고, 팬헤드에 장착된 Load cell (2)에서는 반력을 측정한다.

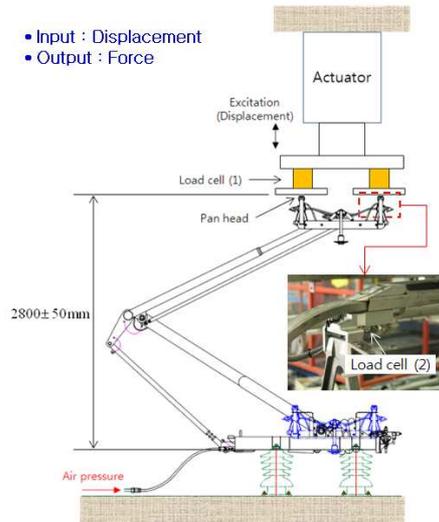


Fig. 3 Following performance test of a pantograph

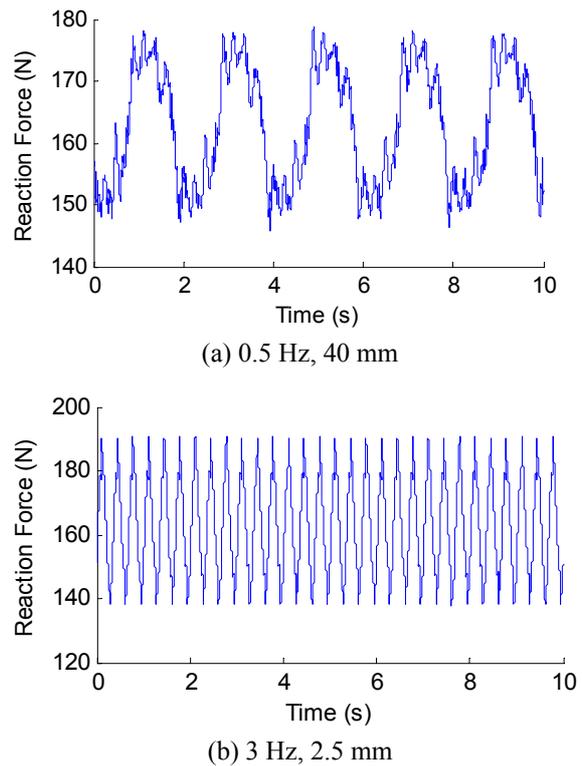


Fig. 4 Following performance test results

Fig. 4 (a), (b)는 각각 0.5 Hz, 40 mm와 3 Hz, 2.5 mm로 가진하였을 때 측정된 시간에 따른 반력 변화 그래프이다.

0.5 Hz부터 20 Hz까지 가진 변위의 주파수와 진폭을 달리하며 실험을 진행하였고, 가진력 및 반력을 측정하였다. 힘에 대한 Auto power spectral density S_{FF} 와 힘과 변위의 Cross power spectral density S_{FY} 를 이용하여 판토크래프의 리셉턴스를

Table 1 Material properties of 3 DOF pantograph model

	Upper	Middle	Low
Mass (kg)	$M_1 = 6$	$M_2 = 12$	$M_3 = 10$
Stiffness (N/m)	$K_1 = 12340$	$K_2 = 13600$	$K_3 = 0$
Damping(Ns/m)	$C_1 = 30$	$C_2 = 0$	$C_3 = 64.9$

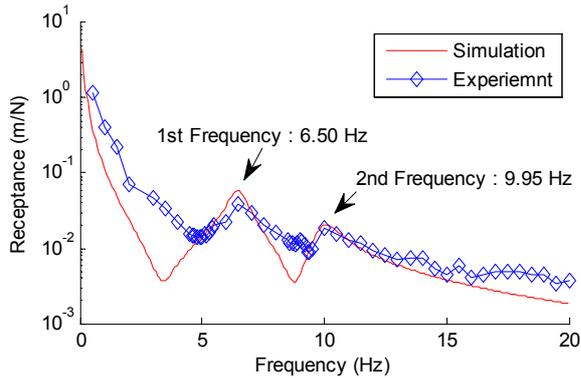


Fig. 5 Receptance comparison of simulation and experiment result

식 (4)와 같이 주파수(ω)에 대한 함수 형태로 구할 수 있다.

$$R(\omega) = \frac{S_{FY}}{S_{FF}} \quad (4)$$

Fig. 5 는 Table 1 의 물성치를 식 (3)에 대입하여 구한 3 자유도 판토티그래프 모델의 리셉턴스 선도와 해석 모델의 신뢰성 검증을 위해 실제 판토티그래프를 실험하여 얻은 리셉턴스 결과를 보여준다. 해석 결과와 실험 결과의 공진 주파수(Fig. 2 에서 피크점)가 일치하도록 최적화 기법⁽¹⁶⁾을 이용하여 Table 1 의 물성치를 선정하였다. 이때 판토티그래프의 최대 진폭 진동수 $\omega_1 = 6.50$ Hz, $\omega_2 = 9.95$ Hz 이다.

3. 가선계 해석 모델

3.1 가선계 유한 요소 모델

Fig. 6 은 본 논문에서 사용한 가선시스템(Catenary system)의 1 경간(Span)을 보여준다. 총 10 개의 경간을 사용하였고, 1 개의 경간은 조가선(Messenger wire), 전차선(Contact wire), 9 개의 드로퍼(Dropper)로 구성되어 있다. 가고(Encumbrance)는 1.2m, 편위(Stagger)는 $\pm 0.2m$, 조가선과 전차선 지지부는 스프링 요소를 사용하여 지표에 고정시켰다. 편위를 구현하기 위해 전차선 지지부의 초기 위치를 횡방향(z 방향)으로 $\pm 0.2m$ 부여하였고, 드로퍼는

Table 2 Finite element information and material properties of the catenary model

	Properties
Messenger wire	<ul style="list-style-type: none"> • Element type : 3D liner Beam • Length of one beam : 0.5 m • Elastic modulus : 110 GPa • Density : 1.07 kg/m • Bracket stiffness : 2×10^6 N/m • Initial tension : 16 kN
Contact wire	<ul style="list-style-type: none"> • Element type : 3D liner Beam • Length of one beam : 0.1 m • Elastic modulus : 118 GPa • Density : 1.35 kg/m • Registration arm stiffness : 200 N/m • Initial tension : 20 kN
Dropper	<ul style="list-style-type: none"> • Tension only spring (Dropper stiffness = 1×10^5 N/m)
Stagger	<ul style="list-style-type: none"> • Initial displacement: $\pm 0.2m$ (Z-direction)

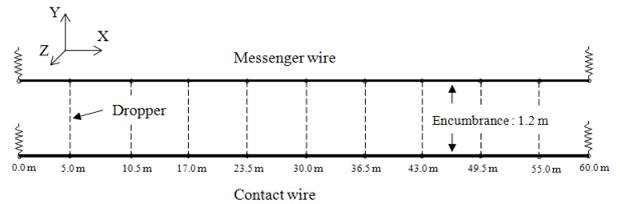


Fig. 6 Catenary system model

100,000N/m 의 인장 강성을 갖지만 압축에 대한 강성은 갖지 않는 인장 유일 스프링(Tension only spring)을 이용하여 모델하였다. 조가선과 전차선은 각각 1.07 kg/m, 1.35 kg/m 의 선밀도를 갖는 빔 요소를 이용하여 모델하였고, 조가선은 16 kN, 접촉선은 20 kN 의 초기 장력을 받고 있다고 가정하였다. Table 2 는 가선계 모델링 정보를 보여준다.

3.2 가선계의 파동 전파 속도

판토티그래프-가선계 동역학 해석에서 가선계의 파동 전파 및 반사는 동적 상호작용에 매우 큰 영향을 끼친다.^(1,10) 차량 주행 속도와 가선계 파동 전파 속도가 같을 경우, 접촉력 공진 현상이 발생하기 때문에 가선계의 설계 조건에 따라 차량의 주행 속도가 결정된다. 따라서 접촉력 해석에 앞서 가선계의 파동 전파 속도가 적절한 수준으로 산출되는지에 대한 검증이 필요하다. 가선계는 장력을 받고 있는 전차선과 조가선이 드로퍼로 연결된 2 단 구조물 이므로 유럽규격 UIC 799 OR 에서 전차선로에서의 파동전파속도 C 를 식 (4)와

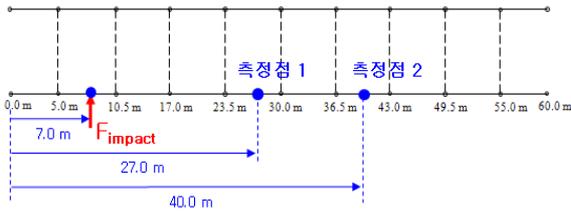


Fig. 7 Simulation method to find the wave propagation speed of the catenary system

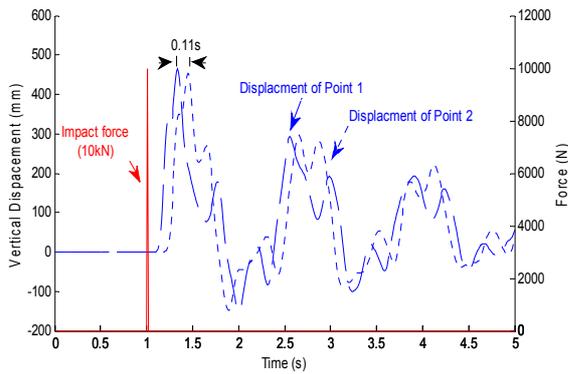


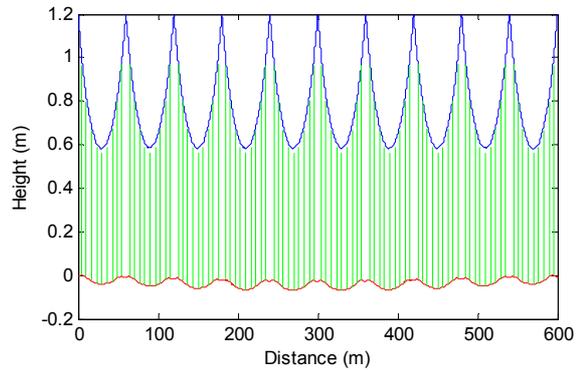
Fig. 8 Vertical displacement variation of points 1 and 2 of the contact wire due to an impact force

같이 규정하고 있다.⁽²⁾

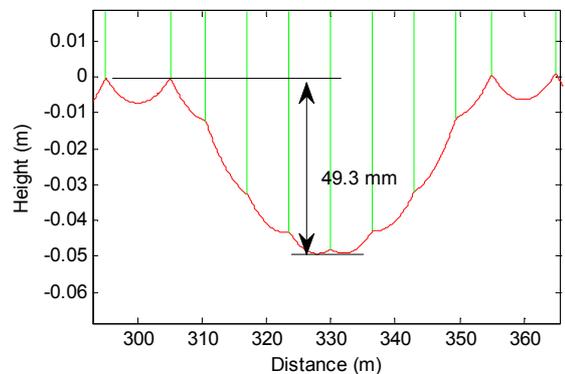
$$C = \sqrt{\frac{T_m + T_c}{\rho_m + \rho_c}} \quad (4)$$

여기서 T_m 은 조가선 장력, T_c 는 전차선 장력, ρ_m 은 조가선 선밀도, ρ_c 는 전차선 선밀도이다. Table 2의 물성치를 대입하여 구한 Fig. 6의 가선계에 대한 이론적 파동 전파 속도 $C^1 = ((16000 + 20000) / (1.07 + 1.35))^{1/2} = 439.1 \text{ km/h}$ 이다.

가선계 해석모델의 파동속도를 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 전차선의 지지금구를 기준으로 7 m 떨어진 곳에 위치한 절점에 수직방향 충격힘 (Impact force)를 가한 후 27 m 떨어진 측정점 1 (Point 1)과 40 m 떨어진 측정점 2 (Point 2)의 수직방향 변위를 측정하였다. Fig. 8은 시간에 따른 충격힘과 측정점 1, 2의 수직방향 변위를 보여준다. 충격힘이 가해지고 난 후 약 0.1 초 후에 측정점 1이 움직이기 시작하고, 측정점 1이 움직이고 난 후 0.11 s 후에는 측정점 2가 움직이기 시작한다. 측정점 1, 2 사이의 거리가 $40 - 27 = 13 \text{ m}$ 이므로, Fig. 3 가선계 모델의 파동 전파속도 $C^2 = 13 / 0.11 = 424.8 \text{ km/h}$ 가 된다. 따라서 424.8 km/h는 이론적 파동 전파 속도 439.1 km/h와 매우 비슷한 수준이기 때문에 (오차율 3.3%), Fig. 6의 가선계를 Table



(a) Static sag of the catenary due to gravity



(b) Maximum sag of the contact wire

Fig. 9 Pre-sag simulation result

2의 유한 요소 정보를 이용해 해석하는 것이 신뢰성이 있다고 결론 내릴 수 있다.

3.3 가선계의 중력에 의한 초기 처짐 해석

실제 가선 시스템에서는 중력에 의한 전차선 초기 처짐이 발생하고, 이러한 초기 처짐량에 따라 접촉력 변동의 크기가 달라진다.⁽¹¹⁾ 실제 가선 시스템 시공시 드로퍼의 길이를 조정하여 전차선의 초기 처짐을 조절한다. 따라서 판토프래프-가선계 해석에 있어서 전차선의 초기 처짐은 반드시 고려해야 하는 중요한 요소이고, 본 논문에서는 다음의 해석 순서를 거쳐 전차선의 초기 처짐을 구현하였다.

- 1) 모든 드로퍼의 길이를 동일하게 설정(1.2m)한 후 중력에 의한 정적 처짐 해석
- 2) 해석 결과와 전차선의 목표 초기 처짐량과의 차이만큼 드로퍼의 길이를 조정하여 정적 처짐 해석 재 수행
- 3) 원하는 처짐량이 나올 때 까지 2)의 해석을 반복

Fig. 9는 중력에 의한 가선계 초기 처짐 해석 결과를 보여준다. 매 구간마다 전차선의 처짐이 비슷한 형태로 반복되어 나타남을 알 수 있고, 경간의 중심

부근에서 발생하는 최대 초기 처짐량은 약 49.3 mm이다.

4. 판토크래프-가선계 집전성능 해석

3 차원 빔요소로 구성된 전차선과 3 자유도의 스프링-댐퍼-질량으로 구성된 판토크래프를 연성시키기 위하여 전차선과 판토크래프사이에서 접촉 조건을 부여하였다. SAMCEF 에서는 절점-요소 접촉(Node to face of an element contact)조건을 제공하여 유연체-유연체 접촉이나 유연체-강체 접촉을 매우 쉽게 구현할 수 있다. Fig. 10 과 같이 접촉을 위한 유연체 평판

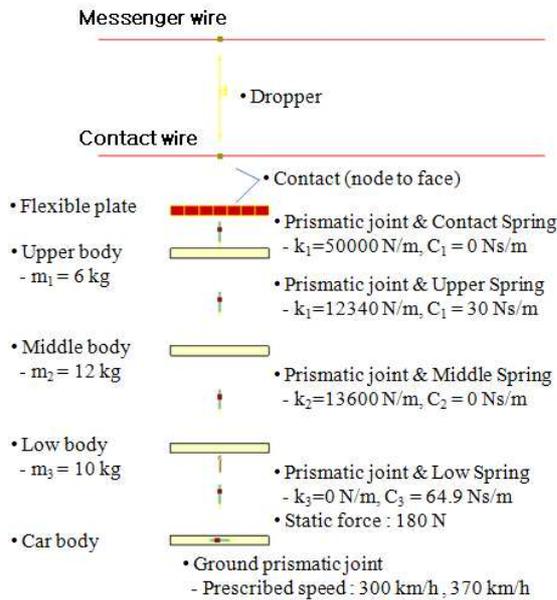


Fig. 10 Simulation model of the pantograph-catenary system

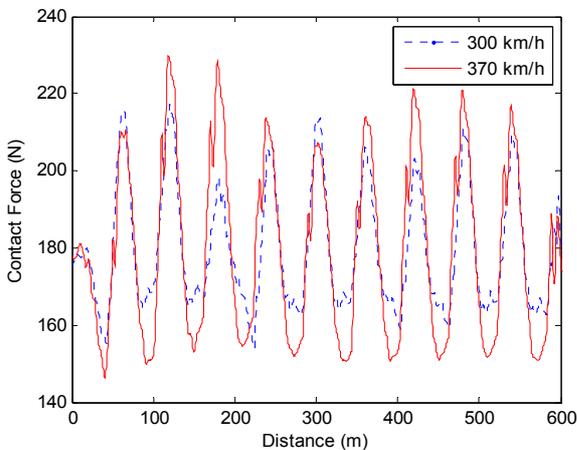


Fig. 11 Contact force variation between the pantograph and catenary

(Flexible plate)을 생성하여 3 차원 빔으로 이루어진 전차선과 접촉조건을 부여하였고, 유연체 평판은 판토크래프 상단 질점(m_1)과 병진조인트로 연결 하였다. 이때 병진조인트에 스프링 요소를 장착하여 50000 N/m 의 강성을 부여하였고, 해석을 진행하는 동안 측정된 스프링 반력을 접촉력으로 간주하였다. 정적 압상력을 180N 을 부여한 상태에서 판토크래프를 300km/h 와 370km/h 로 주행 시켰을 때의 접촉력 변동을 측정하였고, Fig. 11 은 결과를 보여준다.

Fig. 11 에서 파란색 점선과 붉은색 실선은 각각 판토크래프를 300 km/h 와 370 km/h 로 주행시켰을 경우의 결과를 의미한다. 300 km/h 는 KTX 의 운영 속도이고, 370 km/h 는 현재 개발중인 ‘차세대 고속 열차’의 목표 운영 속도이다. 판토크래프를 370 km/h 주행시켰을 때의 접촉력 변동이 300 km/h 주행시보다 크게 나타나고 있고, 매 경간을 지날 때 접촉력이 증가했다가 감소하는 패턴이 반복됨을 알 수 있다.

Fig. 11 의 접촉력 결과를 분석하기 위해 Table 3 과 같이 접촉력에 대한 통계 처리를 실시하였다. EN 50119:2001⁽²⁾에서는 철도 차량의 속도가 200 km/h 이상일 때, 접촉력의 평균값(F_m)은 200 N 미만, 통계적 최대값($F_m+\sigma$)은 350 N 미만, 통계적 최소값($F_m-\sigma$)은 0 초과가 될 것을 규정하고 있다. Table 3 에서 접촉력의 평균은 속도에 상관없이 일정함을 알 수 있다. 370 km/h 의 표준편차(σ)는 22.7 N 으로 300 km/h 의 표준편차 15.9 N 보다 크다. 통계적 최소값의 크기가 300 km/h 에서는 132.1 N, 370 km/h 에서는 111.8 N 으로 모두 양의 크기를 가지므로 전차선과 판토크래프의 이선은 발생하지 않을 것으로 판단되고, 통계적 최대값 또한 속도에 상관없이 350 N 이하로 EN 50119:2001 규정을 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Statistical analysis of contact force results

	Speed (km/h)	
	300	370
Average contact force (F_m) [N]	179.8	179.8
Standard deviation (σ) [N]	15.9	22.7
Statistical Max. ($F_m+\sigma$) [N]	227.5	247.9
Statistical Min. ($F_m-\sigma$) [N]	132.1	111.8

5. 결 론

본 연구에서는 고속 철도 차량용 판토티그래프의 집전성능을 예측하기 위한 유한 요소 해석 모델을 개발하였고 다음과 같은 연구 성과를 도출하였다.

(1) 실제 판토티그래프의 리셉턴스 데이터를 이용하여 3 자유도 판토티그래프 해석 모델의 물성치를 검증하였다.

(2) 가선계의 파동 전파 속도를 UIC 799 기준에 따라 검증하였다.

(3) 드로퍼 길이를 조절하여 중력에 의한 전차선 초기 처짐을 구현하였다.

(4) 판토티그래프가 300 km/h 와 370 km/h 로 주행할 때의 접촉력 변동을 측정하였고, 접촉력에 대한 통계 처리결과를 이용하여 판토티그래프의 전차선 이션 여부를 판단하였다.

추후, 실제 가선 시스템에 대한 해석 모델을 생성하여 접촉력 해석 결과를 분석하고, 이를 실험 결과 비교함으로써 본 논문에서 제시한 해석 모델 및 해석 기법의 신뢰성을 검증할 예정이다. 또한, SAMCEF 를 이용하여 휠/레일 접촉 해석 모델을 개발하고 이를 판토티그래프-가선계 해석 모델과 결합하여 직선 및 곡선 주행시의 집전 성능 변화에 대해 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, J., 1992, "Analysis of Catenary-Pantograph Motion by Green's Function," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 16, No. 8, pp. 1438~1445.
- (2) European Committee for Electrotechnical Standardization EN 50119:2001, 2001, Railway Applications-Fixed Installations-Electric Traction Overhead Contact Line.
- (3) Cho, Y. H., 2008, "Numerical Simulation of Railway Pantograph-Overhead Contact Line Dynamics Considering Dropper Nonlinearity and Contact Wire Pre-sag," Ph.D. dissertation, Seoul National University, pp.1~6.
- (4) Wu, T. X. and Brennan, M. J., 1998, "Basic Analytical Study of Pantograph-Catenary System Dynamics," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 30, pp.

- 443~456.
- (5) Seo, J. H., Jung, I. H., Park, T. W., Mok, J. Y., Kim, Y. G. and Kim, S. W., 2005, "Dynamic Analysis of a Pantograph-Catenary System for High-Speed Train," *J. Korean Society of Precision Engineering*, Vol.22, No.1, pp.152~159.
- (6) Seo, J. H., Kim, S. W., Jung, I. H., Park, T. W., Mok, J. Y., Kim, Y. G. and Chai, J. B., 2006, "Dynamic Analysis of a Pantograph-Catenary System Using Absolute Nodal Coordinates," *Vehicle System Dynamics*, Vol.44, No.8, pp.615~630.
- (7) Shabana, A. A., 2005, "Dynamics of Multibody Systems, 3rd Edition," Cambridge University Press, Cambridge, pp.309~342.
- (8) Rauter, F. G., Pombo, J., Ambrosio, J., Chalansonnet, J., Bobillot A. and Pereira, M. S., 2007, "Contact Model for the Pantograph-Catenary Interaction," *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.1, No.3, pp.447~457.
- (9) Pombo, J., Ambrosio, J., Pereira, M., Rauter, F., Collina, A. and Facchinetti, A., 2009, "Influence of the Aerodynamic Forces on the Pantograph-Catenary System for High-Speed Trains," *Vehicle System Dynamics*, Vol.47, No.11, pp.1327~1347.
- (10) Cho, Y. H., 2008, "Numerical Simulation of the Dynamic Responses of Railway Overhead Contact Lines to a Moving Pantograph, Considering a Nonlinear Dropper," *Journal of Sound and Vibration*, No.315, pp.433~454.
- (11) Cho, Y. H., Lee, K. W., Park, Y., Kang, B. Y., 2010, "Influence of Contact Wire Pre-Sag on the Dynamics of Pantograph-Railway Catenary," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, pp. 1471~1490.
- (12) Samcef user's manual ver.7.3, 2010, SAMTECH.
- (13) Mei, G., Zhang, W., Zhao, H. and Zhang, L., 2006, "A Hybrid Method to Simulate the Interaction of Pantograph and Catenary on Overlap Span," *Vehicle System Dynamics*, Vol.44, supplement, pp.571~580.
- (14) Ewins, D. J., 2000, "Modal Testing - Theory, Practice and Application, 2nd Edition," Research Studies Press Ltd., England, pp.236~238.
- (15) Cho, Y. H., et al, 2009, "Measurement of the Air Resistance Coefficient and Analysis of the Following Performance of the Pantograph," Technical report, Korea Railway Research Institute.
- (16) Jung, S. P., Park, T. W., Jun, K. J., Yoon, J. W., Lee, S. H. and Chung, W. S., 2009, "A Study on the Optimization Method for a Multi-Body System Using the Response Surface Analysis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.23, pp.950~953.
- (17) <http://www.hstrain.re.kr/>