

원도우 환경을 가진 집전성능 시뮬레이션 프로그램(CaPoDyS 1.0) 개발

권상영, 이기원
한국철도기술연구원

Development of a current collection performance simulation program(CaPoDyS 1.0) based on the Windows environment

Samyoung Kwon, Kiwon Lee
Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper describes the simulation algorithms and user interfaces of the self-developed CaPoDyS which is to simulate the dynamic interaction between catenary and pantograph based on FEM. Also, the reliability of the simulation results are discussed through comparing with the ERRI report.

1. 서 론

전기철도에서 차량이 필요로 하는 전력의 수전, 즉, 집전(Current Collection)은 전차선로(Catenary)와 팬터그래프(Pantograph) 시스템의 접촉에 의하여 이루어지게 된다. 열차는 움직임에 따라 전차선로와 팬터그래프 사이에는 기계적인 상호작용이 발생하고 이의 결과로서 집전성능이 나쁠 때는(전차선과 팬터그래프 집전판 사이가 떨어지는 이선(Loss of Contact)이 유발될 때에는) 아크가 발생하고 전력공급 장애, 팬터그래프 집전판 마모, 전차선 손상, 소음 발생, 고조파 및 전자파 방해 등을 야기한다. 따라서 집전성능은 고속전철의 최고 한계속도를 결정하는 핵심 요소가 된다.

전차선로와 팬터그래프 사이의 동력학적 상호작용 특성을 평가하는 집전성능 시뮬레이션은 전기철도의 시스템 엔지니어링, 전차선로 설계, 팬터그래프 설계 과정에서 집전성능에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 결정하는데 기본적으로 거쳐야 할 과정이다. 집전성능 시뮬레이션을 FEM 기반의 범용 구조해석 프로그램으로 실현하기에는 전차선로가 「넓게 펼쳐진 계」라는 점, 전차선과 팬터그래프 사이의 접촉특성, 이선 현상, 드로퍼와 충돌판(Bump Stop), 댐퍼 등의 비선형성 등의 집전시스템만의 고유한 특성으로 인해 어려움이 있다. 따라서, 고속철도 선진국에서는 고유한 프로그램을 개발하여 사용하고 있으나 기술은 공개하지 않고 있다.

본 논문에서는 전차선로와 팬터그래프 시스템의 집전성능과 관련하여 전차선로와 팬터그래프 시스템의 구성과 특성을 알아보고, 시뮬레이션의 이론적 배경을 알아 보며, 자체적으로 개발한 집전성능 시뮬레이션 프로그램인 CaPoDyS Version1.0에 대하여 개발하고 적용한 알고리즘에 대하여 기술하며, 프로그램의 사용자 인터페이스에 대하여 설명하였다. 또한 개발한 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 유럽철도연구원(ERRI)의 시뮬레이션 결과와 비교 검토하였다.

2. 전차선로와 팬터그래프 사이 동력학

2.1 전차선로(Catenary) 시스템

전차선로는 전기열차에 전력을 공급하기 위하여 레일을 따라 공중 가설된 고정 시설물로서 25kV로 가압되어 전류를 흘려주고 있으며, 전차선, 조가선 및 드로퍼 등이 그림1과 같이 복합적으로 가공 현수되어 있다. 전차선(Contact Wire)은 팬터그래프와의 인터페이스를 담당하는 선으로, 레일로부터 일정높이를 유지하도록

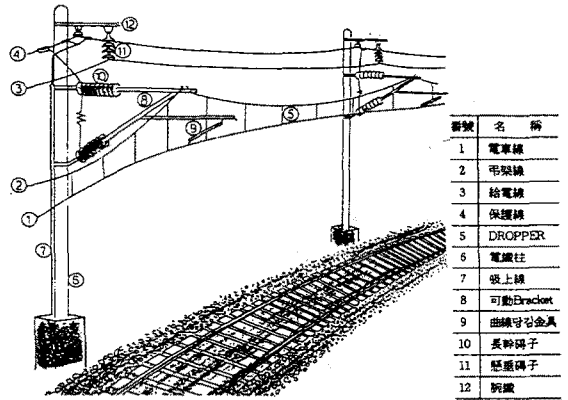


그림 1. Catenary 시스템

수직으로 설치된 드로퍼 선이 잡아주고 있으며, 드로퍼는 다시 Carrier 선인 조가선에 매달리게 되며, 조가선은 일정간격(경간)마다 전주가 지지하게 된다. 따라서, Catenary는 구조적으로 한 경간에 걸쳐 탄성이 불균일할 수밖에 없으며, 이로 인해 팬터그래프와의 복잡한 동력학적 상호작용이 생긴다.

커티너리는 역학적으로 다음과 같이 모델링된다.

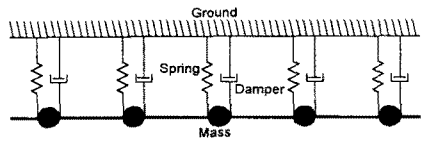


그림 2. 커티너리 해석 모형

2.2 팬터그래프(Pantograph) 시스템

열차 지붕에 설치되어 전차선을 접촉주행(승동)하는 팬터그래프는 다음과 같은 구조를 갖는다.

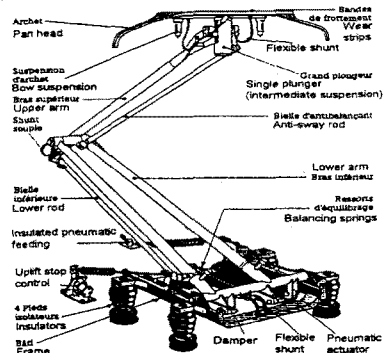


그림 3. Single Arm 타입(프랑스)

Pantograph은 전차선로 운동에 원활히 반응할 수 있도록 스프링과 댐퍼 등을 가지면서 신속한 대응을 위하여 최대한 가볍도록 설계되며, 공기역학적 영향 등 고려 변수가 많다.

2.3 Catenary-Pantograph 상호작용

Catenary계와 Pantograph계는 독립적인 두 구조물이지만 서로 접촉하여 이동함으로써 상호 영향을 받는 연계된 계로서, 동력학적으로 다음과 같은 지배방정식으로 표현된다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial y}{\partial t} + ky = P(t) \delta(x - Vt) \quad (1)$$

여기서,

- y(x,t) : vertical displacement (m)
- T : axial force(tension) (N)
- M : bending moment (Nm)
- ρ : mass density (kg/m³)
- μ(x,t) : damping coefficient (Ns/m)
- k : spring coefficient (N/m)
- EI : flexural rigidity (Nm²)
- P(x,t) : uplift force (N)
- V : train speed (m/s)
- S : section area (m²)

3. 시뮬레이션 프로그램 알고리즘

3.1 시스템 모델링

3.1.1 전차선로 시스템

Catenary는 다음과 같은 특징으로 모델링되었다.

- 1) 전차선, 조가선 등 전선을 현(String) 요소, 즉, 상하(y축) 방향의 1 자유도(DOF)로 모델링한다. 이렇게 되면 식(1)의 지배방정식은 시뮬레이션에서는 다음과 같이 변형되어 적용된다.

$$-T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial y}{\partial t} = P(t) \delta(x - Vt) \quad (2)$$

- 2) 경계조건으로 전체 시뮬레이션 구간의 양 끝단의 전차선, 조가선 및 중간 각 경간의 전주 현수점에서 조가선이 완전 고정되어 있는 것으로 본다.
- 3) 드로퍼에는 축방향력이 작용하며, 압축 시에는 드로퍼 강성이 없는 것으로 보는 비선형성을 적용한다.
- 4) 곡선당김금구로 인해 추가되는 횡장력, 감쇠, 질량 및 국부적인 질량, 강성을 부가할 수 있도록 한다.
- 5) 전차선, 조가선, 드로퍼 선은 1 element-2절점의 유한요소로 분할한 후 전체 계로 조합(Assembly)된다. 이러한 상황을 반영한 모델은 그림4가 된다.

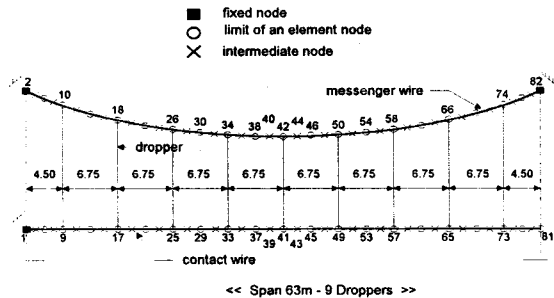


그림 4. Catenary 한 구간(Span)에 대한 모델링

3.1.2 팬터그래프 시스템

Pantograph는 다음과 같은 특징으로 모델링되었다.

- 1) 3단(3 Stage) 타입까지 입력 가능하도록 하며, 각 단은 질량, 스프링, 댐퍼 및 압상력(정적 및 공기역학적)을 갖는다.
- 2) 댐퍼는 마지막 단에 대하여 방향에 따르는 비선형성을 인정한다.

- 3) 각 단에 대하여 충돌판(Friction) 기능을 반영한다. 이러한 상황을 반영한 모델은 그림 5가 된다.

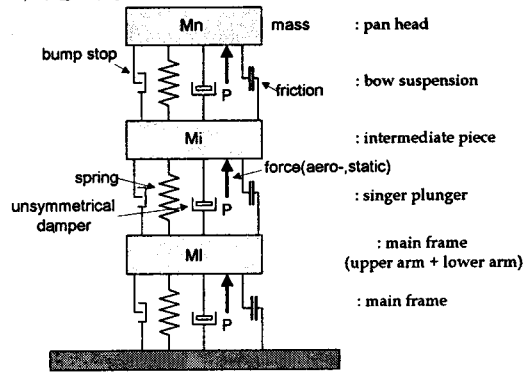


그림 5. Pantograph 해석모형

3.2 수치해석 알고리즘

- 1) Catenary계의 계수행렬 조합에는 Sparsity를 고려하여 Skyline 알고리즘을 채용하였다.
- 2) 결국 커터너리와 팬터그래프계는 아래의 운동방정식으로 귀결된다.

$$[M_c] \{ \ddot{u}_c(x, t) \} + [C_c] \{ \dot{u}_c(x, t) \} + [K_c] \{ u_c(x, t) \} = P(x, t) \quad (3)$$

$$[M_p] \{ \ddot{u}_p(x, t) \} + [C_p] \{ \dot{u}_p(x, t) \} + [K_p] \{ u_p(x, t) \} = P_0 - P(x, t) \quad (4)$$

여기서 [M] [C] [K]는 Catenary와 Pantograph의 질량, 감쇠, 강성계수행렬이며, P₀는 정적 압상력이고, P(x,t)는 전차선로와 팬터그래프와의 상호작용력, 즉 접촉력이다. 이제 동적 응답은 두 방정식을 동시에 풀어야 하는데, 작용력 P(x,t)과 응답값 u(x,t)를 동시에 알아내야 하므로 문제가 쉽지 않다. 이를 해결하는 방법으로 전차선로와 팬터그래프 사이에 가상스프링을 삽입하여 결합시키는 방법을 사용하였다.

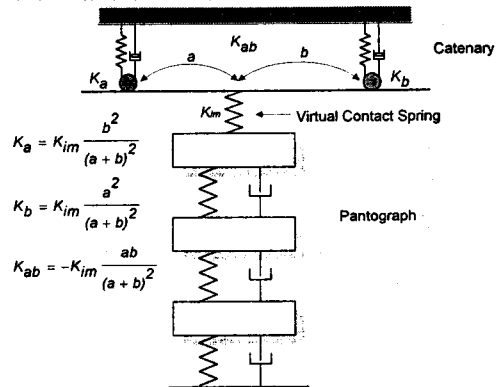


그림 6. 가상스프링 삽입 해석

- 3) 수치적분은 직접적분법 중 Newmark기법을 사용한다. 적분과정에서 매 스텝마다 비선형 발생여부를 체크하고 이를 반영한다.
- 4) 두 개 이상의 팬터그래프가 동시에 주행하는 상황을 시뮬레이션할 수 있도록 프로그램을 작성한다.
- 5) 시뮬레이션 결과 데이터를 필터 처리 및 통계 데이터로 취득할 수 있도록 알고리즘을 만든다.

3.3 프로그램 신뢰성 검증

3.3.1 비교 시뮬레이션

ERRI보고서(A186 프로젝트-1996.4)의 영국 BRR 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교해보기로 한다. 시뮬레이션 대상 커터너리는 프랑스 TGVA 고속선이며 후방 GPU 팬터그래프로 300km/h 주행조건이다.

CaPoDyS를 이용한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

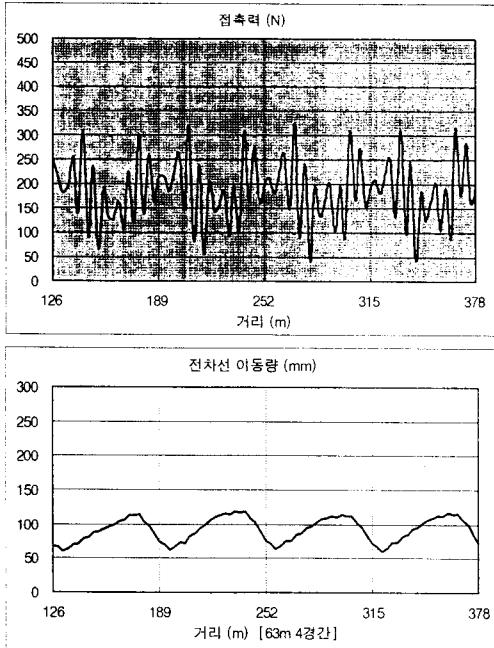


그림 7. CaPoDyS 결과 중 접촉력, 전차선압상량

3.3.2 평가

표 2. ERII와 CaPoDyS의 결과 데이터 비교

항목	ERRI 결과	CaPoDyS결과
평균 접촉력	185~186(N)	185.1(N)
접촉력 표준편차	73~74(N)	70.2(N)
표준편차/평균접촉력	39.5(%)	37.9(%)
정규분포 99.7%내 최저접촉력	-34~-37(N)	-25.5(N)

각자 시뮬레이션에서 사용한 입력데이터를 모두 확인할 방법이 없고, 프로그램의 내부변수가 약간씩 다를 것으로 추정됨에도 불구하고, 위 표에서 보는 바와 같이, 전반적으로 CaPoDyS 결과는 ERII와 신뢰할 수 있는 범위 이내로 접근하고 있음을 알 수 있다.

4. 사용자 인터페이스 개발

요즘 S/W 추세에서 사용자 인터페이스는 매우 중요하다. CaPoDyS(ver1.0)의 사용자 인터페이스는 Windows 환경을 기반으로 설계되었으며, 시뮬레이션 과정 설계에서 데이터 입력의 용이성뿐만 아니라 데이터 입력 과정에서 오류를 줄여 줄 수 있고, 결과를 신속하고 정연하게 파악할 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다. 프로그램의 주요 특징은 다음과 같다.

- 1) 드로퍼 길이 계산, 정적 계산 가능
- 2) 고정점 번호를 시각적으로 쉽게 확인하여 입력 가능

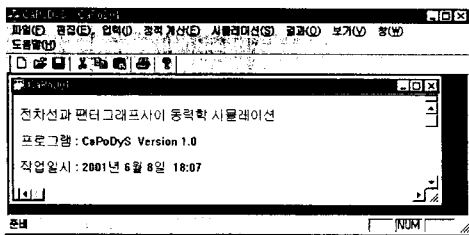


그림 8. CaPoDyS(Ver1.0) 초기화면

- 3) 곡선당김금구, 곡부 추가질량 입력 용이
- 4) 실시간 시뮬레이션 결과데이터 표시 및 그래프
- 5) 이선율을 포함한 통계데이터를 바로 보여줌

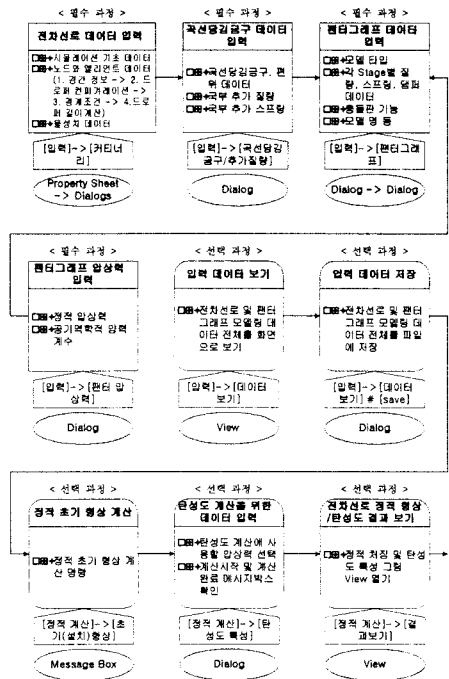


그림 9. 입력 순서 디자인 예

3. 결 론

자체개발한 집전성능 시뮬레이션 프로그램 CaPoDyS는 유한요소이론을 배경으로 전차선로와 팬터그래프의 동력학적 특성을 모델링하고 두 계간의 상호작용을 가상 스프링을 삽입하여 단일 계로 묶는 기법을 사용하였다. 수치 적분과정에서도 전차선로와 팬터그래프간의 특징적인 비선형특성이 반영되도록 알고리즘이 개발되어 사용되었다. 또한 프로그램 사용의 편리성과 신뢰성을 위하여 사용자 인터페이스가 데이터 입력과정의 오류를 줄일 수 있도록 설계되어 개발되었고, 정적 계산 및 드로퍼 길이 계산 등이 가능하고 고정점 및 곡선당김금구 입력 등이 용이하도록 개발되었다.

한편, 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성 비교 검증을 위하여 권위있는 ERII 보고서 결과와 비교한 결과 전반적으로 CaPoDyS 결과가 ERII 결과에 신뢰할 수 있는 범위 이내로 접근하고 있음을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] ERII, "Pantograph/Overhead Line Interaction", ERII A 186/RP1, 1996. 4.
- [2] CEGELEC, "Interaction Catenaire/Pantographe", 경부고속철도 Catenary 기본설계 훈련 교재(Ch7/8 및 별도 교재), 1995. 5.
- [3] 경부고속철도 TGV French Group, "Technical Provisions Catenary Systems", 경부고속철도 제의서 중 Answer to Addendum 18 Appendix 2, 1993
- [4] 架線圖 프로그램 사용자 설명서, 일본철도종합기술연구소
- [5] 고속전철 기술개발 보고서, "고속 전차선 시스템 개발(2차년도 연차보고서)" 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, 1998. 10.
- [6] British Rail Research, "Pantograph / Overhead Line Dynamics", 소프트웨어 패키지 제의서, 1995. 10.