

Runge-Kutta 방법을 통한 철도차량의 커플링모델 연구

Numerical Simulation of Railway Vehicle Coupling through Runge-Kutta 4

김영재*†, 김승택*, 최영진**

Young-Jae Kim*†, Seung-Tech Kim*, Young-Jin Choi**

초 록 철도차량의 연결을 위한 충돌시나리오는 질량-스프링 시스템의 운동방정식으로 표현할 수 있다. 차량은 질량을 갖은 운동물체로 표현이 되며 차량 간 연결기 내부의 고무완충기는 변위에 따른 내력이 비선형인 스프링으로 표현할 수 있다. 이러한 질량-스프링 시스템은 변위에 대한 2계 미분방정식이며 관성력과 강성, 마찰력이 힘의 평형을 이룬다. 본 논문에서는 질량-스프링 시스템의 2계 미분방정식을 풀이하기 위해 Runge-Kutta 4 방법을 활용하여 시간에 따른 차체와 고무완충기의 특성을 살펴본다. 그리고 이를 통해 철도차량의 조차속도 연결 시 이를 평가할 수 있는 방법을 제시한다.

주요어 : Railway vehicle coupling, 조차속도충돌, 철도차량의 연결

1. 서 론

철도차량의 조차속도 연결을 질량-스프링 시스템으로 표현하기 위해서 2계 미분방정식이 사용된다. 이 방정식은 관성력과 강성, 마찰력의 힘의 평형방정식으로 표현되며 이를 수치적으로 접근하기 위해 Runge-Kutta 4 방법을 도입한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

차량 간 인터페이스 구성은 Fig. 1과 같다. 차량의 양단에 노드를 배치하고 해당 위치에서 변위와 가속도를 구한다.

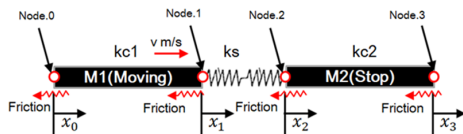


Fig. 1 Interface modeling

2.2 운동방정식

각 노드를 대표하는 운동방정식은 Fig. 2와 같다. 관성력과 강성, 마찰력의 평형관계가 수식으로 표현되며 이를 총 N량의 시스템으로 표현하면 Fig. 3과 같다.

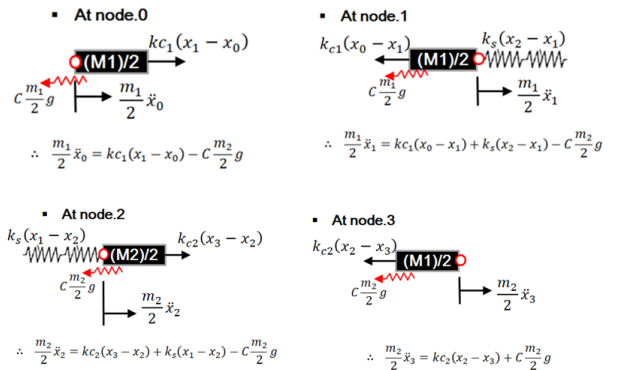
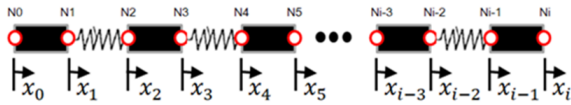


Fig. 2 Force equilibrium at each node

† 교신저자: 현대로템 주식회사
(persimmond@hyundai-rotem.co.kr)

* 현대로템 주식회사

** 현대로템 주식회사



At node 0 $\ddot{x} = \frac{2}{m_1}(-c_2x_0 + c_2x_1 - kc_1x_0 + kc_1x_1 - C\frac{m_1}{2}g)$

At node 1 $\ddot{x} = \frac{2}{m_1}(c_2x_0 - (c_{11} + c_2)x_1 + c_2x_2 + kc_1x_0 - (kc_1 + k_2)x_1 + k_2x_2 - C\frac{m_1}{2}g)$

At node 2 $\ddot{x} = \frac{2}{m_2}(c_2x_1 - (c_{12} + c_2)x_2 + c_2x_3 + k_2x_1 - (kc_2 + k_2)x_2 + kc_2x_3 - C\frac{m_2}{2}g)$

At node 3 $\ddot{x} = \frac{2}{m_2}(c_2x_2 - (c_{13} + c_2)x_3 + c_2x_4 + kc_2x_2 - (kc_2 + k_2)x_3 + k_2x_4 - C\frac{m_2}{2}g)$

At node 4 $\ddot{x} = \frac{2}{m_2}(c_2x_3 - (c_{14} + c_2)x_4 + c_2x_5 + k_2x_3 - (kc_2 + k_2)x_4 + kc_2x_5 - C\frac{m_2}{2}g)$

At node 5 $\ddot{x} = \frac{2}{m_2}(c_2x_4 - (c_{15} + c_2)x_5 + c_2x_6 + kc_2x_4 - (kc_2 + k_2)x_5 + k_2x_6 - C\frac{m_2}{2}g)$

At node i-3 $\ddot{x} = \frac{2}{m_{i-3}}(c_2x_{i-4} - (c_{1i-3} + c_2)x_{i-3} + c_2x_{i-2} + k_2x_{i-4} - (kc_2 + k_2)x_{i-3} + k_2x_{i-2} - C\frac{m_{i-3}}{2}g)$

At node i-2 $\ddot{x} = \frac{2}{m_{i-2}}(c_2x_{i-3} - (c_{1i-2} + c_2)x_{i-2} + c_2x_{i-1} + k_2x_{i-3} - (kc_2 + k_2)x_{i-2} + k_2x_{i-1} - C\frac{m_{i-2}}{2}g)$

At node i-1 $\ddot{x} = \frac{2}{m_{i-1}}(c_2x_{i-2} - (c_{1i-1} + c_2)x_{i-1} + c_2x_i + k_2x_{i-2} - (kc_2 + k_2)x_{i-1} + k_2x_i - C\frac{m_{i-1}}{2}g)$

At node i $\ddot{x} = \frac{2}{m_i}(c_2x_{i-1} - c_2x_i + k_2x_{i-1} - k_2x_i - C\frac{m_i}{2}g)$

Fig. 3 Force equilibrium equation at each node

2.3 해석조건 및 결과

Runge-Kutta 4로 정리된 운동방정식을 계산한 뒤 상용컴퓨터 언어로 프로그램을 만들었다. 4량 1편성의 열차를 구현하였고 각 차량의 연결기가 존재하는 인터페이스에는 EFG3 고무완충기를 적용하였다. 각 차량의 번호와 인터페이스 번호 그리고 노드의 순서는 그림 4와 같다. 모든 차량의 결과가 충분히 표현되는 해석시간을 적용했고 타임스텝은 0.001로 설정했다.



Fig. 4 Analysis condition

해석결과 각 노드의 변위와 속도는 Fig. 5, Fig. 6 과 같고 인터페이스에 위치한 EFG3의 반력은 Fig. 7 과 같다.

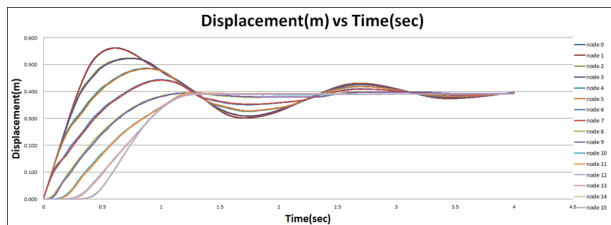


Fig. 5 Displacement(m) - Time(sec)

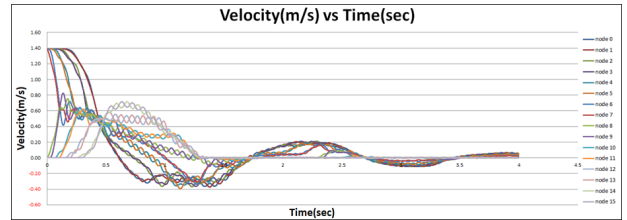


Fig. 6 Velocity(m/sec) - Time(sec)

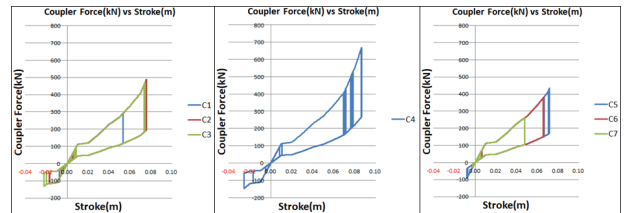


Fig. 7 Reaction force(kN) - Displacement(m)

3. 결론

Fig. 5 변위-시간 그래프를 통해 운동차량이 먼저 움직이고 정지차량은 일정 시간 후에 변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 정지차량에 작용하는 정지마찰력 이상의 힘이 작용해야 정지차량이 운동을 시작하기 때문이다. Fig. 6 속도-시간 그래프에서는 차량의 속도를 보여준다. Fig. 5의 그래프를 시간에 따라 미분한 결과 값이 도출됨을 알 수 있고 최대 변위에서 속도가 0 이되는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 7 연결기반력-시간 그래프에서는 각 인터페이스의 EFG3변위에 따른 반력 양상을 나타낸다. EFG3는 영구적 에너지흡수부재로 충돌과정에서 압축과 인장을 반복하며 에너지를 흡수했음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 철도차량 기술기준
- [2] EN15227-2020
- [3] EN15227규격을 만족하는 트램용 충돌흡수부재 개발