

궤간가변대차용 윤축시스템의 동역학적 해석

Dynamic Analysis of Variable-Gauge Wheelset

이동원* 배대성** 한준석 †¹ 장승호 †² 나희승 †²
Lee, Dong-Won Bae, Dae-Sung Han, Joon-Suk Jang, Seung-Ho Na, Hee-Seung

ABSTRACT

The variable-gauge wheelset drives on the variable railways. It doesn't need to replace or move the carriages to another bogie parts. This paper is for dynamic analysis of the variable-gauge wheelset. 3D-Virtual Mock-up program was developed to verify the operating mechanism and understand dynamic characteristics for German RAFIL-V variable-gauge wheelset. When the system is going through the width-variable railway, its safety depends on the stiffness and velocity. So the numerical and contact model of this system were developed. This solution is useful to analyze dynamic characteristics for variable-gauge wheelset.

1. 서론

현재 우리나라는 경의선, 동해선 등을 통해서 남북철도의 연결을 추진하고 있으며 더 나아가 러시아 TSR과 중국 TCR과의 대륙철도 연결을 추진하고 있다. 그러나 대륙철도와의 연결에 있어서 기술적인 문제점 중 하나는 각 국가의 궤간이 상이하어 대차 교환이나 환적이 불가피하다는 것이며, 이로 인한 추가적인 인프라와 시간, 경비가 철도 수송의 경제성을 저하시키는 요인이 되고 있다. 이를 위해 동북아 물류체계 및 동북아 철도네트워크에 적합한 궤간 가변 장치의 개발이 요구되어지고 있다.

이러한 궤간 가변 장치는 기계적인 구조물로서 이에 대한 이론 연구 핵심 기술인 메카니즘 및 동적 거동 연구가 필수적이며, 이를 통한 개념 및 상세 설계 연구의 효율적인 수행이 기대되어지고 있다. 그러나 현재 우리나라에서는 이러한 궤간 가변 장치에 대한 동적 거동 해석이 전무한 상태이며, 궤간 가변 대차의 운용환경이 없어서 이에 대한 국외 개발 경험의 기술 지원과 자체 기술력 확보를 위한 연구가 필수적이다.

이번 연구에서는 동역학 해석을 위한 상용 프로그램인 RecurDyn을 통하여 가변 대차와 선로의 수치 모델과 접촉 모델을 개발하고, 이것을 기반으로 궤간 가변 시스템의 작동성 원리를 검증하였으며, 궤간 가변 시스템의 궤간 가변 구간 통과시 통과 속도의 변화에 따른 동응답 특성 변화에 대하여 알아보았다.

* 한양대학교 정밀기계공학과 석사과정

** 한양대학교 정밀기계공학과 교수, 정회원

†¹ 한국철도기술연구원 연구원

†² 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 본 문

기존의 직교좌표를 사용하는 ADAMS나 DADS 등과 같은 상용 프로그램에서는 운동방정식과 구속조건의 공식화와 코딩이 쉬운 반면, 각 강체마다 6개 정도의 일반좌표가 사용되므로 운동방정식의 생성시 행렬의 크기가 커지게 되고, 이에 따라 해석시 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 이번 연구에서는 궤간 가변 시스템의 가변 구간 통과시의 속도와 가변시스템에 들어가는 스프링의 탄성계수를 달리하여 많은 동적거동해석을 실시하여야 하므로 상대적으로 적은 해석 시간이 요구된다. 이에 따라 상대적으로 적은 시간이 소요되는 상대좌표를 이용한 프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 연구를 수행하였다.

2.1 상대좌표를 이용한 두 강체 사이의 기구학적 상관 관계

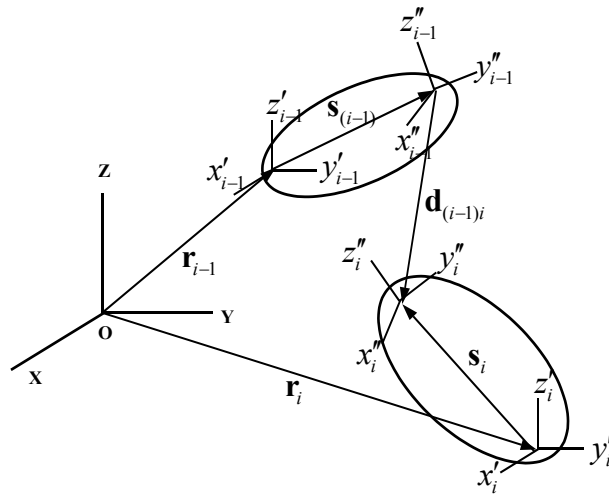


그림1. 인접한 두 강체 사이의 기구학적 상관관계

그림1은 인접한 두개의 강체에 대한 기구학적인 상관관계를 보여준다. $x_{(i-1)'} - y_{(i-1)'} - z_{(i-1)'}$, $x'_i - y'_i - z'_i$ 는 각각 i-1, i 강체 자신의 좌표계이고 X-Y-Z 좌표계는 기준 관성 좌표계이며, $x'' - y'' - z''$ 는 두 강체 사이의 조인트 좌표계이다.

일반적으로 상대운동을 하고 있는 한 쌍의 강체가 조인트로 연결되어 있을 때 관성축에서 본 i 강체의 위치는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{(i-1)} + \mathbf{s}_{(i-1)i} + \mathbf{d}_{(i-1)i} - \mathbf{s}_{i(i-1)} \quad (1)$$

이때의 속도 관계식은,

$$\dot{\omega}'_i = \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \dot{\omega}'_{i-1} + \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \mathbf{H}'_{(i-1)i} \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}'_i &= \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \dot{\mathbf{r}}'_{(i-1)} \\ &\quad - \mathbf{A}_{(i-1)i}^T (\tilde{\mathbf{s}}'_{(i-1)i} + \tilde{\mathbf{d}}'_{(i-1)i} - \mathbf{A}_{(i-1)i} \tilde{\mathbf{s}}'_{i(i-1)} \mathbf{A}_{(i-1)i}^T) \dot{\omega}'_{(i-1)} \\ &\quad + \mathbf{A}_{(i-1)i}^T ((\dot{\mathbf{d}}'_{(i-1)i})_{\mathbf{q}_{(i-1)i}} + \mathbf{A}_{(i-1)i} \tilde{\mathbf{s}}'_{i(i-1)} \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \mathbf{H}'_{(i-1)i}) \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \end{aligned} \quad (3)$$

이며, 이것은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{B}_{(i-1)i1} \mathbf{Y}_{(i-1)} + \mathbf{B}_{(i-1)i2} \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \quad (4)$$

2.2 상대좌표를 이용한 두 강체 사이의 Contact 관계

철도차량은 기본적으로 Wheel과 Rail의 접촉력을 이용하여 이동하는 System으로 구성되어 있다. 이번 연구에서는 이러한 접촉 특성을 이용하여 Wheelset의 동적 거동을 해석하는 것으로 Contact Force의 사용이 중요한 비중을 차지하고 있다고 하겠다. 이러한 Contact는 RecurDyn에서 Sphere to Surface, Surface to Surface등과 같은 여러 방식으로 제공되어 지고 있으며 여기에는 아래의 그림과 같은 상대적인 관계를 가지고 있다.

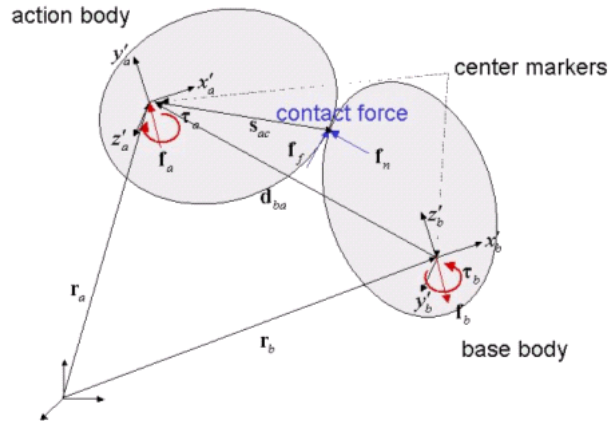


그림2. Contact Force의 관계 모식도

Contact시 발생하는 Force에는 Normal Force와 Friction에 의해서 생기는 Friction Force가 있으며, Normal Force를 계산할 때에는 Spring Coefficient와 Damping Coefficient를 사용하며, Friction Force를 계산할 때에는 Friction Coefficient를 사용한다. 아래는 Friction Force의 계산식을 나타낸 것이다.

$$f_n = k\delta^{m_1} + c\frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|}|\dot{\delta}|^{m_2}\delta^{m_3} \quad (5)$$

$$f_f = \mu(v)|f_n| \quad (6)$$

이때 f_n 은 Contact시 Normal Force를 나타내며 m_1, m_2, m_3 는 각각 stiffness, damping 및 indentation exponents를 의미하고, f_f 는 Friction Force를 나타내며 v 는 relative tangential velocity를 나타낸다.

2.3 모델의 생성

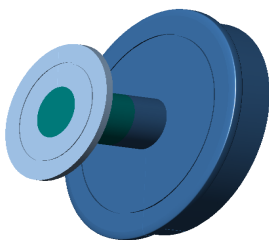


그림3. Wheel Part

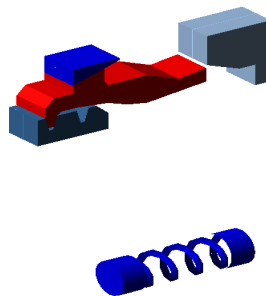


그림4. Lever Part

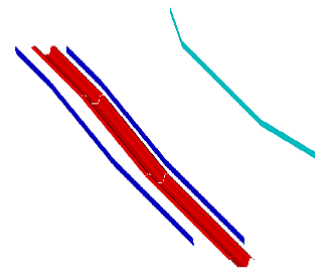


그림5. Rail 부 시스템

이번 연구에서 다루는 궤간가변 철도차량 모델은 현재 독일에서 사용하고 있는 궤간 가변 차량을 대상으로 하였다. 시뮬레이션 모델은 Wheelset 부 시스템과 Rail 부 시스템으로 이루어져 있으며, Wheelset 부 시스템은 하나의 Axle Body에 2개의 Wheel part로 구성되고, 하나의 Wheel part는 대한 3개의 Lever part로 구성되어 있다. 또한 Rail 부 시스템은 하나의 Grooved Rail과 2개의 Protecting Rail, 하나의 Unlocking Rail로 구성되어 있으며, Wheelset 부 시스템과 Rail 부 시스템 사이에는 Contact Element로 상호관계를 가진다.

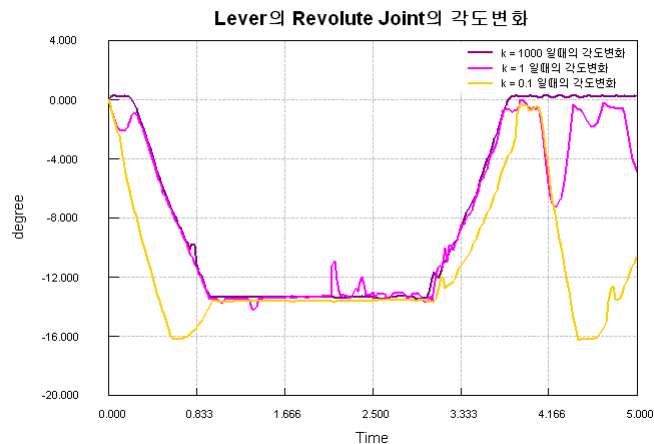
이때 Wheelset 부 시스템에 있는 Lever part는 Wheel part에 대하여 1개의 Revolute Joint와 2개의 Fixed Joint, 1개의 Spring Force로 Wheel part에 연결되며, Wheel part는 Axle Body에 대하여 1개의 Fixed Joint와 2개의 Translational Joint로 연결되어 있다. 또한 Lever part는 Wheel part에 대하여 Contact Element와 Spring Force를 통하여 상호 작용하며, Wheel part는 Axle Body에 대하여 Contact Element를 통하여 상호작용 하도록 시스템을 구성하였다.

2.4 시뮬레이션 결과

이번 연구에서는 표준궤 1435mm에서 광궤 1520mm로 가변을 실시할 때 가변시스템에 들어가는 스프링의 탄성계수를 변경하는 것과 가변 구간 통과 허용 속도를 변경하는 것에 대하여 시뮬레이션을 실시하여 결과를 도출해 보았다.

첫번째로, 궤간가변 시스템 안에는 Lever와 Spring으로 이루어진 가변장치가 사용되어지는데, 이때 사용되어지는 Spring의 탄성계수는 현재 가지고 있는 데이터 값이 없기 때문에 이를 실질적으로 제작하여 사용하기 위해서 이 Spring의 탄성계수 최소값을 결정하는 것이 중요하다. 가변시스템의 Lever part에 들어가는 스프링의 탄성계수 최소값을 구하기 위한 비교대상으로 $k=1000\text{N/mm}$ 를 사용하였으며, 이 $k=1000\text{N/mm}$ 값은 14.4km/h 에서 궤간 가변을 실시하였을 때 안정적인 시뮬레이션 결과가 도출된 k 값이다. 결과 비교 Graph는 다음과 같다.

도표1. k 값에 따른 Lever의 Revolute Joint의 각도변화



위의 도표1에서 보는 바와 같이 $k=1000\text{N/mm}$ 인 경우의 Graph가 안정적으로 궤간가변이 일어난 상태인데, 이에 반하여 $k=0.1\text{N/mm}$ 인 경우의 Graph는 다른 경우에 비하여 많은 변화를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 $k=1.0\text{N/mm}$, $k=1000\text{N/mm}$ 일 때의 동적거동을 통하여 스프링의 탄성계수가 작게 설정되어 나타난 현상임을 직관적으로 알 수가 있다. 그러므로, $14.4\text{km/h}(4000\text{mm/s})$ 의 속도로 궤간 가변 구간을 통과할 시에는 적어도 1.0N/mm 보다 큰 탄성계수가 요구되어진다.

두번째로, 궤간가변 시스템은 외국의 경우 궤간가변 구간을 $10\sim 15\text{km/h}$ 의 속도로 통과하고 있는데, 이것은 궤간가변시에 이 시스템의 안전성을 확보하기 위한 하나의 방법으로 보여진다. 이러한

통과속도가 시스템의 안전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 가변장치에 들어가는 Spring Coefficient를 10 N/mm 으로 고정하고 가변 구간의 통과 속도를 높여서 최대 통과 허용 속도가 어느 정도 되는지 알아보았다. 이때 시스템은 UIC에서 20.0t의 축중에 적합해야 한다는 규정에 따라 윤축에 20ton의 무게가 축중으로 작용할 때의 최대 통과 허용 속도를 구하는 작업을 수행하였다.

도표2. 속도의 변화에 따른 Wheel의 Y 방향 변위

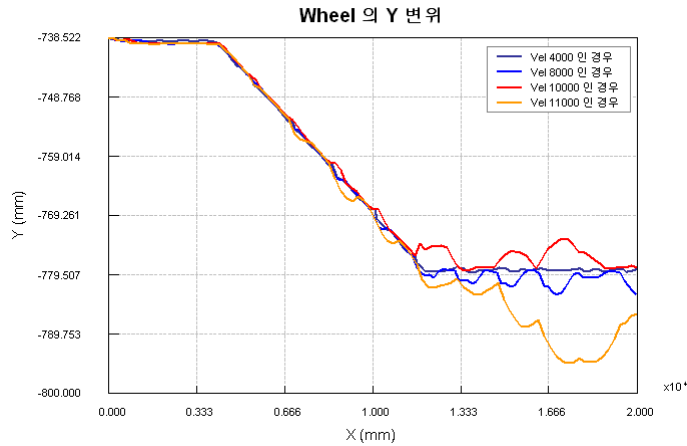


도표2는 20ton의 무게가 축중으로 작용할 때에 가변 구간을 지나는 Wheel의 Y방향 변위를 나타낸 것이다. 통과속도가 4000mm/sec 인 경우는 도표에서 보는 바와 같이 가변 Rail의 형상과 흡사한 안정적인 결과를 나타내 보이며 그이상의 속도인 5000mm/sec 속도에서 부터는 불안정한 상태를 나타내기 시작한다. 이러한 불안정 상태의 기준은 Wheel의 Z방향 높이가 초기 상태보다 높아질 때를 기준으로 하였다. 그러므로, 궤간가변 시스템의 안정성 확보를 위한 가변구간 통과 허용 속도는 외국의 경우와 같은 10~15km/h 가 적당하다 하겠다.

참고문헌

1. D.S. Bae, and Edward J. Haug(1987), "A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: part 1. Open Loop Systems, Mech. Struct. And Machines", Vol.15, No.3, pp. 359-382
2. D.S. Bae, and Edward J. Haug(1987), "A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: part 2. Closed Loop Systems, Mech. Struct. And Machines", Vol.15, No.4, pp. 481-506
3. Edward J. Haug(1989), "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume 1 : Basic Methods" p347-p392
4. D.S. Bae, C.H. Lee, and D.J. Yun(2003), "Integration Methods for Realtime Simulation of Multibody Vehicle Models", International Conference
5. C.K. Park, Y.G. Kim, and D.S. Bae(2002), "Analysis of Vehicle Limit Considering the Dynamic Behavior for an Urban Train", 한국소음진동공학회
6. Y.K. Kim, C.K. Park, E.H. Lee, T.W. Park, and D.S. Bae(2002), "Analysis of Correlation with Evaluation Methods of Ride Comfort for the Railway", 한국소음진동공학회
7. C.K. Park, Y.G. Kim, D.S. Bae, and T.W. Park(2002), "Efficient Optimization of the Suspension Characteristics Using Response Surface Model for Korean High Speed Train", 한국소음진동공학회