

탄성체를 이용한 궤간가변 대차용 윤축시스템의 접촉력 해석

Contact Mechanics of Variable-Gauge Wheelsets With Flexible Body

이영주* 배대성** 김완구*** 장승호¹ 한준석²
Lee, Young-Joo Bae, Dae-Sung Kim, Wan-Goo Jang, Seung-Ho Han, Jun-Suk

ABSTRACT

Research interest on flexible body dynamics, has been increased recently. The major application areas are the auto-mobile, train, and heavy machinery. This paper attempted the dynamic analysis for the variable-gauge wheelset with a flexible body, to better understand the dynamic characteristics of the variable-gauge wheelset. In order to achieve this goal, a 3D-Virtual Mock-up model was built. The tendency of the stress and deformation for the flexible lever was investigated through component mode synthesis, contact mechanics and flexible body dynamics. This study is a pioneering work for the development of Korean type variable-gauge wheelset.

1. 서 론

우리나라는 동북아의 물류 유통의 중심이 되기 위한 일환으로 경의선 동해선등 남북한 철도의 연결을 추진하고 있으며 중국의 TCR, 러시아의 TSR을 연결하여 유럽까지 진출 할 수 있는 철도의 연결망을 계획하고 있다. 그러나 TCR과 TSR등 각국에서 사용하고 있는 궤간이 서로 달라 대차교환이나 환적이 불가피하다. 이는 추가적인 인프라 및 시간, 경비가 철도수송의 경제성 및 효율성을 저하시킨다. 따라서 동북아 물류 체계 및 철도 네트워크를 구성하기 위한 독자적인 궤간가변 장치의 개발이 요구 되고 있다.

하지만 우리나라에서는 궤간 가변 장치에 대한 연구가 전무하며 궤간 가변 대차의 운용환경이 없어 독자적인 연구 개발 및 기술력 확보를 위한 연구가 필수적이다. 이에 2004년 궤간가변 메커니즘 연구를 시작하여 가변 대차와 선로의 수치 모델 및 접촉 모델을 개발하였고 궤간가변 시스템의 작동 원리 검증 및 궤간 가변 시 통과 속도에 따른 동응답 특성 변화를 연구하였다.

이번 연구에서는 위의 연구를 바탕으로 상용 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 궤간가변 시스템의 일부분을 강체가 아닌 탄성체로 대체하여 해석하였다. CMS를 이용하여 탄성체의 거대한 자유도를 좌표축의 변환으로 효율적으로 줄였으며 레버와 상호 작용하는 부분과의 접촉력 연구를 통해 레버의 변형 및 스트레스의 분포 및 경향을 파악하였다.

* 한양대학교 대학원생, 비회원

** 한양대학교 교수, 정회원

***Functionbay(주)

¹ 한국 철도 기술 연구원 책임 연구원, 정회원

² 한국 철도기술 연구원, 연구원

2. 이론적 배경

본 연구에서 질량은 Lumped mass로 가정 하였으며 탄성체의 변형과 변형률은 매우 작다는 가정을 전체로 하였다. 탄성체의 자유도 수가 거대하여 이를 통해 얻어지는 모드 형상 벡터 역시 많은 계산 시간을 요하게 된다. 따라서 CMS를 사용하여 시스템에 높은 에너지 기여도를 갖는 낮은 주파수 영역만 사용하여 해석의 효율성을 고려하여 하였다.

2.1 탄성체의 절점의 변위

탄성체에 외력이 가해져 변형이 발생하는 모습을 그림 2.1에서 나타내었다. $X-Y-Z$ 축은 관성 좌표계를 나타내며, $X'-Y'-Z'$ 은 탄성체의 고정 좌표계를 나타낸다. 관성 좌표계에서 변형이 일어나기 전의 절점 P에 대한 위치 벡터와 변형후의 위치 벡터는 \mathbf{u}'_{op} 와 \mathbf{u}'_p 이며 \mathbf{d}'_p 는 탄성체의 고정 좌표계에서 변형 후 절점 P의 위치벡터이며 식(1)과 같이 표현하였다.

$$\mathbf{d}'_p = \mathbf{u}'_{op} + \mathbf{u}'_p \quad (1)$$

탄성체의 변형 \mathbf{u} 는 각 절점에 대해 모드 형상 벡터(Φ)들을 가중치에 대한 선형 조합을 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^M \Phi_i \alpha_i = \Phi \mathbf{a} \quad (2)$$

2.2 CMS(Component Mode Synsis)

탄성체인 잠금 레버와 강제인 다른 부품간의 접촉모션을 CMS를 이용하여 구현하였다. 먼저 잠금 레버의 경계 조건에 따른 Normal mode를 생성하고, Contact node에 가해지는 접촉하중(Contact force)에 의한 Static correction mode(SCM)를 얻었다. 생성된 SCM은 다시 Normal mode에 더해져 탄성체의 접촉에 대한 모드를 얻었다. 본 연구에서는 잠금 레버의 형상으로 인한 매우 높은 주파수의 Normal mode를 피하기 위하여 fixed-fixed Normal mode보다 free-free Normal mode를 사용하여 50개의 모드를 얻었다. Static correction mode는 레버에 많은 접촉력이 가해지는 부분을 분석하여 레버의 앞부분을 고정하여 모드를 얻었다. 사용한 모드의 선택

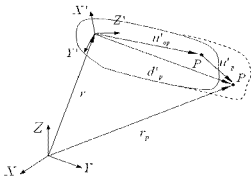


그림 2.1 탄성체의 변형

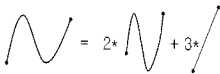


그림 2.2 형상 벡터의 합성

기준은 관심 부분인 레버의 앞부분의 변형이 2자유도이므로 이를 기준으로 그 모드를 제외하여 해석한 경우와 선택한 경우와 비교하여 Normal mode와 Static correction mode의 합성으로 얻어진 모드 중에서 총 18개의 모드를 선별하였다. 시스템의 CMS를 적용한 고유치문제를 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$([K]_{CMS} - \omega_i^2 [M]_{CMS})[\bar{Z}]_i = \bar{0} \quad (3)$$

여기서 $[K]$ 와 $[M]$ 은 각각 강성행렬과 질량행렬을, ω 는 고유진동수이며 i 는 모드 번호를 표시한다. $[\bar{Z}]$ 는 전체 시스템의 Normal mode를 나타낸다. 식(3)으로부터 해석하고자 하는 시스템의 j 번째 하부구조(Substructure)를 좌표계 변환을 통해 식(4)를 유도 하였다.

$$([K_{nn}]_j - \omega_i^2 [M_{nn}]_j)[\bar{D}]_i = \bar{0}, \quad [\Phi_{non}]_j = [\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_s]_j \quad (4)$$

n 은 고정되지 않은 하위 구조의 자유도를 나타내며 i 은 하위구조 요소의 모드들, $[\bar{D}]_j$ 는 하위시스템의 Normal Mode이며 Modal Matrix $[\Phi]_j$ 의 열벡터이다. Static Correction Mode는 식(4)와 같이 강성행렬을 경계조건을 통해 고정되는 부분과 고정되지 않는 내부의 하위 구조로 나누어 정적인 해석을 통해 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} I \\ \Phi_{scm} \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}_j, \quad [\Phi_{scm}]_j = -[K_{nn}]_j^{-1} [K_{ns}]_j \quad (5)$$

I 는 단위행렬이며, Φ_{scm} 은 m 번째 구속된 자유도의 단위 변위에 대해 구속되지 않은 벡터의 집합이며 R 은 구속된 절점에서의 반력에 대한 벡터의 집합이다. 좌변의 식을 전개하여 Φ_{scm} 을 얻을 수 있다. 식(4)와 식(5)로부터 하위구조와 상위구조 사이의 변환 행렬 $[W]_j$ 를 얻을 수 있다.

$$[W]_j = \begin{bmatrix} \Phi_{non} & \Phi_{scm} \\ 0 & I \end{bmatrix}_j \quad (6)$$

$$[K]_{red} = [W]_j^T [K] [W]_j, \quad [M]_{red} = [W]_j^T [M] [W]_j \quad (7)$$

식(6)의 변환행렬 $[W]_j$ 에 의해 j 번째의 하위구조에 대해 축소된 강성행렬 $[K]_{red}$ 과 질량행렬 $[M]_{red}$ 이 얻어진다.[식(7)] Total Strain Energy와 System Kinetic Energy로부터 Langrange Equation은 지배 방정식인 식(8)로 유도된다.

$$[M]_{red} \ddot{q} + [K]_{red} q = Q \quad (8)$$

2.3 Contact Mechanics

레간가변 윤축 모델은 기본적으로 각 바디 혹은 레일과 휠의 상호접촉에 의해 작동하게 된다. 이러한 접촉(Contact)을 RecurDyn의 Sphere to Sphere와 Sphere to Surface를 이용하여 윤축 모델에 구현하였으며 이에 대한 각각의 상호 작용에 대한 관계는 그림2.3에서 보여주고 있다.

접촉은 Normal Force와 Friction Force에 의해 이루어지며 Normal force는 Spring Coefficient와 Damping Coefficient를 이용하여 Friction Force는 Friction Coefficient를 이용하여 나타낸다.

$$f_n = k\delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (9)$$

$$f_f = \mu(v) |f_n| \quad (10)$$

여기서 f_n , f_f 는 각각 Normal force와 Friction Force를 나타낸다. 그리고 m_1 , m_2 , m_3 는 순서대로 Stiffness, Damping 그리고 Indentation Exponents를 의미한다. v 는 Relative tangential velocity를 나타낸다.

3. 탄성체 잠김 레버 모델 및 구간가변 윤축 모델

탄성체로 모델링 된 잠김 레버는 육면체 요소(Hexagonal Element)로 메쉬(Mesh)하여 14400개의 요소로 나누었다. 탄성체에 극부적으로 큰 하중이 가해질 경우 하중을 받는 노드나 요소에서만 극부적인 변형이 발생하게 됨으로 이를 방지하기 위하여 RBE(Rigid Body Element)를 적용하였다. 즉 잠김 레버는 접촉(Contact)에 의해 상대적으로 큰 하중을 받는 곳에서 그 요소들에서만 변형이 없는 강체요소처럼 거동하도록 하였다.

구간가변의 윤축 시스템은 먼저 강체로 모델링 하였으며 한쪽 바위에 3개씩의 잠김 레버가 장착된다. 본 연구에서는 하나의 잠김 레버만 탄성체로 대체하였다. 이는 각 잠김 레버의 형상과 물성치가 모두 동일하며 동시에 동일한 메커니즘으로 작동하게 됨으로 하나의 레버만으로도 충분히 탄성체의 특성을 파악 할 수 있기 때문이다. 그림3.2에서 녹색의 레버만 탄성체이며 빨간색 레버는 모두 강체이다.

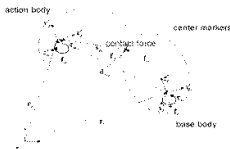


그림 2.3 contact force의 모식도

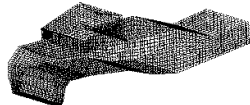


그림 3.1 탄성체로 모델링 된 잠김 레버

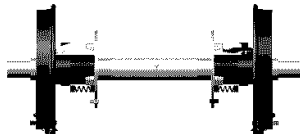


그림 3.2. 탄성체가 적용된 구간가변 시스템의 윤축 모델

4. 해석 결과

4.1 Contact Force



그림 4.1 레버와 Groove의 Contact

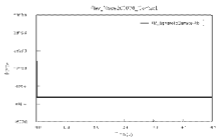


그림 4.2 ①의 Contact Force

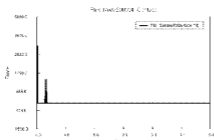


그림 4.3 ②에서의 Contact Force

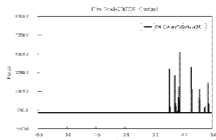


그림 4.4 ②에서의 Contact Force

4.2 Displacement와 Stress Distribution

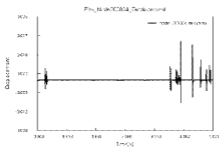


그림 4.5 레버 앞부분의 변형(좌)



그림 4.6 레버의 Stress 분포 경향(이대 좌, 우)

4.3 해석 결과 분석

본 연구에서 가장 관심을 가지고 해석한 부분은 잠김 레버의 앞부분이다. 그림4.1의 세 부분에서 높은 Contact Force가 발생하였고 Release Disk가 Guide rail을 벗어나는 시간대에서 약 5654N의 가장 높은 Force가 측정 되었다. 변형 역시 같은 시간대에서 최대 변형인 0.0155mm가 측정되었다. 레버에 나타나는 스트레스 분포는 그림 4.6에서처럼 레버의 각이 진 부분에서 높은 분포를 보였으며 특히 레버의 밑 부분에서 가장 높은 분포를 보였다. 그림4.6 스트레스 분포가 원형으로 나타나는 것은 이 해석기법의 특성으로 바디의 중심을 기준으로 하여 분포를 나타내게 된다.

5 결론

본 연구에서 상용 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 계간가변 시스템의 잠김 레버를 강체에서 탄성체로 대체하여 해석하였다. 탄성체의 자유도를 줄이기 위하여 CMS를 사용하였고 잠김 레버와 상호 작용하는 부품과의 접촉력을 Contact Mechanics를 이용하여 해석하여 이를 바탕으로 변형과 스트레스 분포 경향을 알아보았다.

계간가변시스템에서 가변 시작 시간대와 끝나는 시간대에서 비교적 높은 Contact force와 변형이 나타났다. 스트레스는 레버의 윗부분(그림4.6 아래 좌)에서 특히 면과 면이 만나는 부분에서 많은 분포를 보이며 특히 아래 부분에서는 최대 스트레스 분포 경향을 나타내었다.

본 연구는 선행된 연구에서 얻어진 파라미터들을 바탕으로 하여 연구되었다. 더욱 신뢰성을 더 높이기 위해서는 물성치에 대한 정확한 정보 및 마찰계수에 대한 연구가 필수적이라 사료된다.

6 감사의 글

본 연구는 건설 교통부에서 주관하며 철도 기술연구원의 국가 교통 핵심 기술 관련위탁 과제의 일환으로 진행 및 지원되었습니다. 물심양면으로 도움을 주신 여러분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

7. 참고 문헌

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. C.K. Park, Y.G. Kim, and D.S. Bae(2002), "Analysis of Vehicle Limit Considering the Dynamic 한국소음진동공학회 Behavior for an Urban Train".
5. Y.K. Kim, C.K. Park, E.H. Lee, T.W. Park, and D.S. Bae(2002), "Analysis of Correlation with 한국소음진동공학회 Evaluation Methods of Ride Comfort for the Railway".
6. Roy R. Craig Jr., and Mervyn C. C. Bampton(1968, " Coupling of Substructures for Dynamics Analysis", AIAA JOURNAL Vol. 6 No7, July 1968.