

동력분산형 고속철도의 주행성능 해석기술 연구

Dynamic behavior analysis of the high speed EMC(Electric Multiple Unit)

윤지원** 박태원* 이문구* 전갑진** 박성문** 김정범**
Yoon, Ji-Won Park, Tae-Won Lee, Moon-Gu Jun, Kab-Jin Park, Sung-Moon Kim, Jung-Bum

ABSTRACT

The development of a new railway vehicle is under progress through the Next Generation High-Speed Rail Development Project in Korea. Its aim is to develop fundamental technology of the vehicle that can run over 400km/h. The new distributed traction bogie system, 'HEMU' (High-speed Electric Multiple Unit), will be used and is different from previously developed high speed railway vehicles. Previous vehicles adopted push-pull type system, which means one traction-car drives rest of the vehicle. Due to the difference, investigation on dynamic behavior and its safety evaluation are necessary, as a part of verification of the design specification. In this paper, current progresses of researches are presented. And the High-Speed Railway vehicle system is evaluated for a dynamic characteristic simulation. Proper models including air-suspension system, wheel-rail, bogie and car-body will be developed according to the vehicle simulation scenario. International safety standard will be applied for final verification of the system. This research can propose a better solution when test running shows a problem in the parts and elements. Finally, the vehicle that has excellent performance will be developed, promoting academic achievement and technical development.

1. 서 론

최근 세계 철도 선진국들은 더 빠르고 안전한 고속철도 시스템 개발을 위해 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 우리나라 고속철도 분야는 한국형 고속 열차 개발을 통해 원천 설계 기술은 확보하였으나 고속철도의 원천 설계 기술을 확대, 응용하고 철도산업을 지속 가능한 미래 성장 동력 산업으로 발전시키기 위해 차세대 고속철도 기술의 개발이 과거 어느 때보다 시급히 요구되고 있는 실정이다 [1]. 향후 경부고속선의 2020년도 1일 예상 이용객은 15만 여명으로 추정된다. 이는 2007년도 1일 이용객의 2배에 달하는 수이다. 날로 급증하는 여객 수요 해결을 위해서는 열차운행횟수를 늘리는 방법이 있지만, 한정된 선로용량으로 인해 이 방법도 한계가 있다. 이러한 시대적 요구에 부합하는 차세대 고속철도는 단계적인 속도향상과 대량 수송이 가능하도록 개발되어야 한다. 현재 운행 중인 KTX와 개발 중인 G7차량의 대차방식은 동력집중식이다. 동력집중식은 대차별 축 하중이 높아 고속 차량에는 적합하지 않다. 또한 관절형 대차이기 때문에 이는 차량의 편성 및 분리 등이 수월하지 않고 충돌 에너지 흡수에 별도의 고려를 하여야 하는 단점이 많다. 최고시속 400km를 목표로 개발되고 있는 차세대 고속철도차량은 분산형 모듈의 개념을 갖고 있는 열차 시스템이다 [2].

* 아주대학교, 기계공학부, 회원

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

** 아주대학교, 기계공학과

대차의 방식이 기존의 집중식 열차 시스템과는 다르기 때문에 이에 따른 고속 주행 시의 동특성을 파악하고 주행 안전성에 대한 기술 개발 및 설계 결과에 대한 입증은 필요로 한다.

본 연구에서는 고속 철도 차량 시스템을 구성하는 주행 성능 해석을 실시한다. 이와 관련된 공기현가 장치, 휠-레일, 대차, 차체 등의 주된 요소부품의 기본 특성을 구현하는 모델을 개발하고 시스템의 해석 기술을 정리한다. 특히 CAE(Computer Aided Engineering)를 이용한 동역학 해석 기술은 차세대 고속철도 개발 기간의 단축과 개발비용의 절감에 매우 결정적인 역할을 할 것이다. 이와 더불어 주행 성능 해석 기술을 이용하여 차량설계를 지원하고 주행 시나리오를 수립한다. 또한 국제 기준에 따른 안전도 검사를 위한 시뮬레이션 해석을 통해 최종적으로 시운전 시험 결과를 이용하여 주행 모델의 신뢰성을 확보한다. 더불어 시운전시 나타나는 부품의 문제점 보완 방안을 제안하는데 있다.

2. 연구내용

2.1 요소 해석 기술

주행성능 해석 기술 향상과 요소 부품해석을 위해 먼저 전체 차량의 시뮬레이션을 통해 실제와 비슷한 거동을 보이게 함으로써 차량설계의 가용성 여부를 판단한다. 이를 통해 동역학 해석 및 시스템 거동 분석을 해야 한다. 1차년도에서는 요소부품의 해석과 개념설계 단계의 차량 해석기술 지원 및 해석 모델을 개발하고 이와 더불어 가선계와 판토 시스템 해석 기술을 개발한다.

2.1.1 히스테리시스를 고려한 부싱 개발 및 적용

철도차량의 현가장치에서는 주요 요소별 부싱을 사용한다. 부싱 모델링을 위해 기존의 기구학적 조인트 모델, 선형, 비선형 부싱모델은 선형강성요소와 선형점성요소로 각 자유도 방향에 대한 선형의 조합으로 표현이 된다. 그러나 기존의 모델에서는 부싱의 히스테리시스 특성 표현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 그림1의 부싱 좌표계를 사용하여 새로운 부싱 모델인 Bouc-Wen모델에 히스테리시스 특성을 표현한다 [3]. Bouc-Wen모델에서는 적절한 파라미터의 선택으로 다양한 응답을 나타낼 수 있다. Bouc-Wen모델을 이용한 운동방정식은 식(1)과 같다. x 는 변위, z 는 가상 히스테리시스 변위, k_0 는 스프링 상수, c_0 는 댐핑계수, $F(t)$ 는 가진력을 의미하며, α 의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이고 비선형 성분에 대한 선형 성분의 비를 의미한다. 본 연구를 통한 동역학 해석 프로그램 개발 시 이러한 모델링 사항을 반영하여 효율적으로 부싱모델의 비선형성과 히스테리시스를 구현하고자 한다. 이를 통해서 좀 더 정확한 모델 개발과 더불어 주행 안정성 평가가 가능할 것이다.

$$F(t) = c_0 \dot{x} + \alpha k_0 x + (1 - \alpha) k_0 z \quad (1)$$

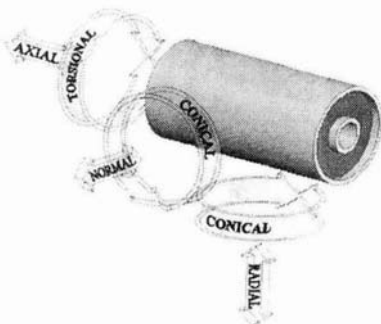


그림 1. 부싱 좌표계

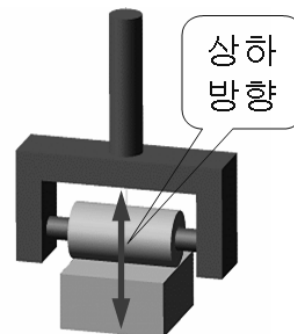


그림 2. ADAMS 해석 모델(부싱)

2.1.2 공기현가 요소를 포함한 현가계 모델링 및 해석 모델링 기술

동역학 모델에서 공기 스프링을 구현할 경우 그에 따른 변수가 너무 많고 비선형성을 띄기 때문에 모델링에 어려움이 있다. 그래서 일반적으로 단순 비선형스프링으로 모델링하여 왔다. 기존 모델링 방법에서는 실제 거동시 발생하는 히스테리시스를 충분히 반영하지 못하여 모델링의 정확성이 떨어지는 문제점이 있다. 동역학 모델의 공기 스프링 모델을 개발하기 위하여 철도나 대형 차량, 정밀 부품을 운반하는 무진동 화물차량과 같은 높은 수준의 승차감을 위한 공기스프링 동역학적 모델링에 대해서는 연구가 많이 이루어졌다 [4]. 하지만 동역학 해석에 적용한 사례와 동역학적 모델링 방법에 대해서는 그 연구가 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 기존 한빛 200열차의 동역학 모델링 과정에서 사용된 공기스프링의 동역학 모델링을 이용하여 차세대 고속철도 열차의 동역학 해석에 적합한 동역학 모델링 기법을 연구하고 적용하여 보다 신뢰성 높은 철도 모델을 개발하는데 있다. 동역학 모델의 공기 현가 이론식은 식(2)와 같다. A^* 는 면적변화율, P_0 는 초기압력, ΔL 은 스프링 변위, V_0 는 초기변위, γ 는 각각 상태변수를 나타낸다. 실제 실험치를 이용한 모델로 수학적 모델링보다는 보다 현실성이 있으면서 모델하기 쉽다는 장점이 있다.

$$F_{air} = A^* \cdot P_0 \left(1 + \frac{A^* \Delta L}{V_0} \right)^{-\gamma} \quad (2)$$

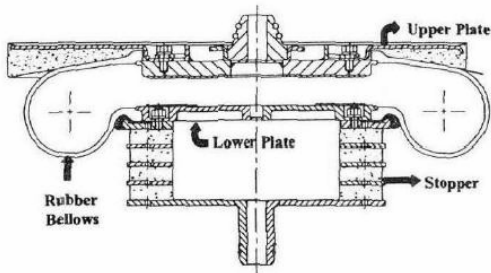


그림 3. 철도차량용 공기스프링(벨로우즈형)

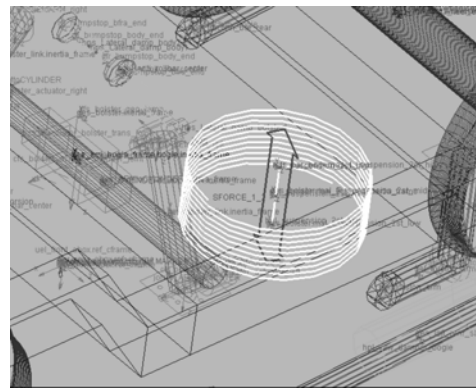


그림 4. Air Spring 모델링

2.2 주행 성능 해석과 안전성 해석

차세대 고속철도 개발에 있어 전체적인 철도차량의 주행성능을 해석하고 요구사항에 맞게 설계하는 것은 중요하다. 이를 위해서는 전산기구 동역학 모델링과 그 해석 기술의 개발이 필요하다. CAE 기술은 시스템 및 부품의 설계 및 해석 과정에 응용된다. 설계, 해석, 시험, 생산, 조립 단계의 모든 개발 과정을 초기의 제품 개발단계에서 병렬적으로 시뮬레이션 하기 위해 활용됨으로써, 궁극적으로 제품개발기간의 단축과 생산비용의 절감 그리고 제품 품질의 향상에 중대한 역할을 하게 될 것이다. 이를 위하여 휠-레일 접촉요소 개발 및 이를 적용한 주행 모델 개발이 필요하다. 대차, 차체 등의 철도차량을 구성하는 모델을 해석하기 위해서 기존의 강체 해석을 위한 직각좌표계와 더불어 모달 좌표계와 절대 절점좌표계를 도입하여 차량 파트의 각 시스템에 적용될 수 있도록 해야 한다. 이것을 통해 철도 차량의 동역학적 거동분석과 차량의 안정성 해석 또한 가능할 것이다.

2.2.1 휠-레일 접촉 요소 개발 및 이를 적용한 주행 모델 개발

휠-레일 접촉의 이론 개발과 프로그램 개발은 이미 많은 연구자들에 의해서 개발되어졌고 그것을 바탕으로 개발된 상용프로그램에서 휠-레일 접촉을 포함한 동역학 해석이 가능하다 [5]. 하지만 휠-레일

접촉 모듈 개발은 종합적인 거동 분석 및 일반 상용 프로그램에서 해석하기 쉽지 않은 문제들에 대한 연구시 기본적으로 제공되어야 하는 필수적인 요소이다. 이는 휠-레일과 교량 등의 구조적 특성을 고려한 거동 분석이나 판도와 가선계와의 상호 작용 연구에 있어서도 중요한 역할을 한다. 휠-레일 접촉 이론은 대부분 칼커의 이론식[6]을 바탕으로 접근하여 기본식을 세우고 관련 이론들을 유도하게 된다.

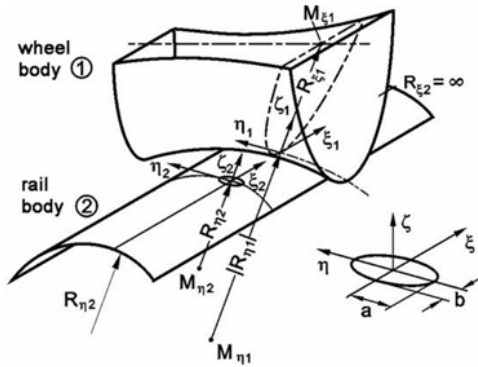


그림 5. 휠셋과 레일간 접촉 현상 [5]

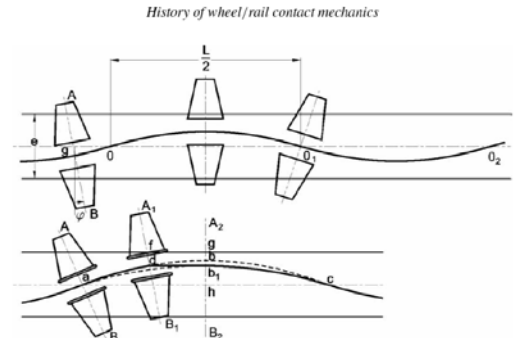


Figure 7. CIRCULAR motion of a rigid wheel set with conical profiles according to Kline's Course Book

그림 6. 휠셋의 사인 함수 거동 [5]

2.2.2 노달 좌표계를 이용한 해석기 개발

다양한 기계분야에서 시스템의 고속화, 경량화로 인한 부품의 작은 탄성변형(Elastic Deformation)은 제품의 피로파괴를 유발하는 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부품의 탄성 변형을 고려한 동역학 해석으로부터 피로의 주요한 원인인 정확한 동응력을 계산하려는 많은 연구가 진행되어 왔다. Prof. Shabana교수가 제안한 절대절점좌표를 이용하여 다물체 동역학 해석 중에 물체의 변위, 속도, 가속도, 힘 등의 동적 특성은 물론, 물체의 구조적인 특성인 변형량(Strain)이나 동응력까지도 동시에 계산할 수 있는 방법을 제안한다. 탄성체의 대변형 현상을 고려하기 위하여 유한요소법의 절대절점좌표와 형상함수를 이용한 연속체 개념으로 유도되었기 때문에 이러한 절차를 활용함으로써 시스템의 다물체 동역학 해석 중에 대변형 범 요소에 대한 임의의 위치에서의 변형율과 동응력을 동시에 계산할 수 있게 된다 [7].

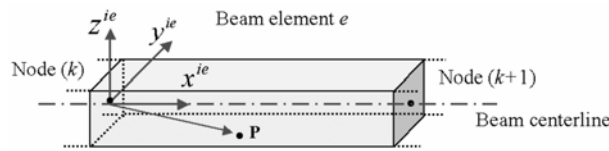


그림 7. Local element coordinates of a beam element

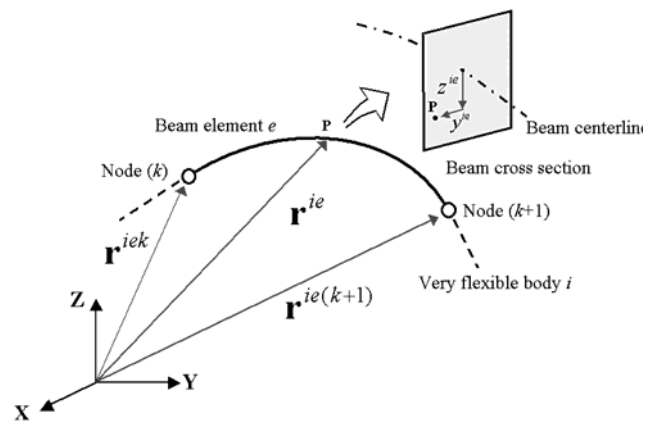


그림 8. Deformation of a beam after a general motion

2.2.3 모달 좌표계를 이용한 해석기 개발

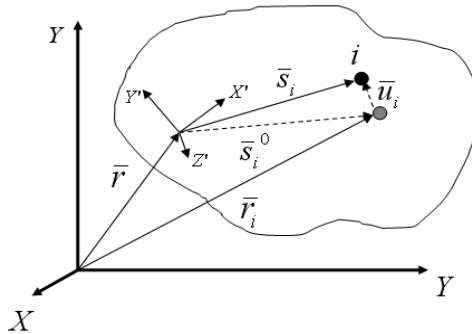


그림 9. 모달좌표계를 이용한 변위표현

3차원 공간에서 운동하는 유연체 내부의 임의의 점 i 는 식(3)과 같이 표현된다 [8].

$$\bar{r} = \bar{r} + A\bar{S}' = \bar{r} + A(\bar{S}^{0'} + \bar{u}') \quad (3)$$

여기서 A 는 좌표계 변환행렬(Transpose matrix), \bar{S}^0 는 변형전의 위치벡터, \bar{u}_i 는 변형에 의한 점 i 의 병진노드 변위이다. 점 i 에 대응하는 병진 및 회전 자유도의 변형 모달 행렬은 다음과 같이 표시한다.

$$\psi^i = [\psi_i^{i'} \quad \psi_i^{i''}] \quad (4)$$

모달행렬을 이용한 병진 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i^{i'} = \psi_i^{i'} \bar{a} \quad (5)$$

여기서 \bar{a} 는 모달 위치 벡터이다. 식(3)과 식(5)을 이용하여 정리하면 식(6)와 같다.

$$\bar{r}_i = \bar{r} + A(\bar{S}_i^{0'} + \psi_i^{i'} \bar{a}) \quad (6)$$

3. 활용방안

본 사업을 통해 타 과제와 이전 사업에서는 고려되지 않았던 요소개발과 적용을 통해 보다 현실적인 모델을 시뮬레이션 할 수 있게 될 것이다. 이것은 안전과 진동이 가장 큰 문제가 되는 열차에서 보다 정확한 해석과 빠른 피드백을 통해서 설계지원을 할 수 있음을 뜻한다. 이는 향후 유사 사업진행이나 개념설계시 여러 가지 설계안의 검토로 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 주행성능 해석기술을 바탕으로 (주)로템과의 원활한 상호 교류를 통해서 개념설계, 기초설계, 상세설계, 제작설계의 단계를 거친다. 현재 주행해석에 사용할 수 있는 상용프로그램이 많이 개발되어 나온 상황이지만 이것은 특별한 상황만을 고려한다든지 사용자가 임의로 모델을 수정하거나 혹은 사용자중심의 프로그램이 아닌 아주 일반적인 동역학을 해석할 수 있는 경우가 대부분이다. 하지만 이번 사업을 통해서 지금까지 어떤 프로그램도 하지 못했던 여러 가지 효율적인 좌표계시스템을 통해서 각 파트를 효율적으로 구현하고 그것들의 종합적인 해석을 통해서 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 전용해석 기술을 개발 할 수 있다. 이것은 설계검토 및 사양비교에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 차세대 고속철도 사업은 본 과제를 통해 다음과 같은 기대 효과를 얻을 수가 있다. 기술적인 측면으로는 축적된 주행해석 기술을 통한 효율적인 해석, 실험과 비교, 설계안 검토를 할 수 있다. 또한 사용자 전용프로그램 개발을 통해 정확한 해석을

위한 기초 요소 개발을 할 수가 있다. 사회, 경제적 측면으로는 지속가능한 고속철도 기술 경쟁력을 확보하고 국내외 기술개발 추이를 고려한 고속화 및 대용량 고속철도개발을 할 수가 있다. 이를 통해 최초차량개발부터 최종 시운전 평가(10만km)를 하나의 계획으로 추진하여 개발기간 단축 및 사업비 절감 효과를 가져 올 수 있다. 무엇보다도 차세대 고속철도 사업을 통해 분산식 철도시스템의 기술이전, 기술개발 및 기술의 고도화 등 국내기술, 산업 전반에 대한 파급 효과가 클 것으로 예상된다.

4. 결론

본 과제의 연구는 차세대 고속철도 사업에서 주행성능 해석 기술 향상과 요소 부품의 해석, 시스템 해석 기술 개발의 성공에 매우 결정적인 역할을 할 것이다. 향후 차세대 고속철도 사업은 미래 사회의 요구를 충족 시킬 수 있는 종합적인 교통서비스 패키지로 그 입지를 더욱 확고히 할 것이다. 본 사업을 통해 차세대 고속철도 사업의 체계적인 발전을 이루고, 세계적으로 뛰어난 주행성능을 가진 차량이 개발될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 차세대고속철도기술개발사업 기획보고서(2006, 5), 한국철도기술연구원
2. 김기환, 박찬경, 김석원, (2006년), “차세대 고속철도기술개발사업 추진방향”, 한국철도학회 추계 학술대회논문집, 11, pp.7-12
3. 옥진규, 문상혁, 유완석, 이승규, 손정현, ‘Bouc-Wen 모델을 이용한 차량 동역학 해석 용 부상 모델링에 대한 연구’, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.1336~1341, 2005
4. 박찬경, 김영국, 현승호 ‘고속전철의 동적특성에 따른 효율적인 현가장치 최적화 방안 연구’, 대한기계학회 춘추학술대회, 제1권 제2호, pp.501~506, 2001.
5. Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Nos. 1-2, January-February 2008, 9-26, History of wheel/rail contact mechanics: from Redtenbacher to Kalker
6. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact, Kluwer academic publishers, J. J. Kalker, 1990
7. Ahmed. A. Shabana, 1998, " Computer implementation of the absolute nodal coordinate formulation for flexible multibody dynamics", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 16, pp.293~306
8. W.S.Yoo, E.J.Haug, ‘Dynamics of Articulated Structures. Part 1. Theory’, *J.Struct.Mech.*, 14(1), pp.105~126, 1986.