동력분산형 고속철도 주행성능 동역학 해석을 위한 기반기술 개발

Development of fundamental technology for dynamic analysis of the high speed EMU (Electric Multiple Unit)

윤지원† 박태원* 전갑진** 박성문** 정광열**

Yoon, Ji-Won Park, Tae-Won 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 develope 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 that of previously developed high speed railway vehicles. Previous vehicles adopted push-pull type system, which means one traction-car drives rest all 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 the paper, current progresses of researches are presented. And the High-Speed Railway vehicle system is evaluated for a dynamic characteristic simulation. Proper dynamic models including air-suspension system, wheel-rail, bogie and car-body is developed according to the vehicle simulation scenario. The basic platform for the development of dynamic solver is prepared using nodal, modal coordinate system and wheel-rail contact module. Operating scenario is prepared using commercial dynamic analysis program and used for development of dynamic model, which contains many parts such as carbodies, bogies and suspension systems. Furthermore, international safety standard is applied for final verification of the system. Finally, the reliability of the dynamic model will be verified with test results in the further researches. This research will propose a better solution when test results 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 개발중인 G7차량의 대차방식은 동력집중식이다. 동력집중식은 대차별 축 하중이 높아 고속 차량에는 적합하지가 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].

† 책임저자 : 정회원, 아주대학교, 기계공학과, 박사과정
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965
* 정회원, 아주대학교, 기계공학부, 교수
** 정회원, 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 입증을 필요로 한다.

본 연구에서는 고속 철도 차량 시스템을 구성하는 주요 요소의 해석 기술을 개발하고 주행시스템 래석 기술을 개발하였다. 이와 관련된 공기현가 장치, 휠-레일, 대차, 차체 등의 주된 요소부품의 기본 특성을 구현하는 모델을 개발하고 시스템의 해석 기술을 개발하였다. 이와 더불어 동역학 해석 기술을 이용하여 차량모델을 작성하고 주행 시나리오를 수립하였다. 또한 국제 기준에 따른 안전도 검사를 위한 시뮬레이션 해석을 통해 최종적으로 추후 시운전 시험 결과를 이용하여 주행 모델의 신뢰성을 확보하게 될 것이다.

2. 연구내용

2.1 요소 해석 기술 개발

고속철 차량의 주행성능 해석과 차량의 주요 요소의 부품해석을 위해 먼저 차량 동역학 시뮬레이션을 통해 차량 설계 모델의 가용성 여부를 판단한다. 이를 통해 차량의 동역학 해석 및 시스템 거동 분석을 필요로 한다. 이를 위한 기반기술을 위해 부시와 공기현가와 같은 요소 부품의 해석과 개념설계 단계의 차량 해석기술 지원 및 해석 모델을 개발하였고 이와 더불어 가선계와 판토 등의 시스템 해석 기초 기술을 개발하였다.

2.1.1 히스테리시스를 고려한 부시 개발 및 적용

철도차량의 현가장치에서는 주요 요소별 부싱을 사용한다. 부시 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.

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

x는 변위, z는 가상 히스테리시스 변위, k_0는 스프링 상수, c_0는 댐핑계수, $F(t)$는 가진력을 의미하며, α의 범위는 $0 \le \alpha \le 1$이고 비선형 성분에 대한 선형 성분의 비를 의미한다. 본 연구를 통해서 동역학 해석 프로그램 개발 시 이러한 모델링 사항을 반영하여 효율적으로 부싱모델의 비선형성과 히

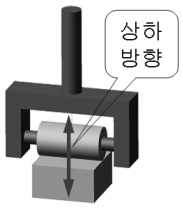


그림 1. ADAMS 해석 모델(부시)

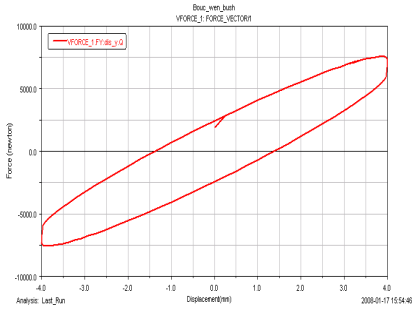


그림 2. ADAMS 해석 결과

스테리시스를 구현하였다. 이를 통해서 좀 더 정확한 모델 개발과 더불어 주행 안정성 평가가 가능할

것이다. 그림 1은 부시요소를 만들기 위한 좌표계 설정과 ADAMS 해석 모델을 나타낸다. 그림 2는 ADAMS를 통한 해석 결과를 나타낸다. 이를 통해 히스테리시스가 잘 구현되고 있음을 확인하였다. 향후 차년도 고속철도 차량의 제원이 확정과 더불어 시험을 통한 모델의 신뢰성 확인이 가능할 것이다.

2.1.2 공기현가 요소를 포함한 현가계 모델링 및 해석 모델링 기술

공기 현가 장치 모델을 구현할 경우 그에 따른 변수 선정이 어렵고 많은 변수들이 비선형성을 나타내기 때문에 동역학 모델링 시 어려움이 있다. 때문에 일반적으로 단순 비선형스프링으로 모델링하여 왔다. 따라서 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]. 본 연구에서는 기존 한빛 200열차의 동역학 모델링 과정에서 사용된 공기스프링의 동역학 모델링을 이용하여 차세대 고속철도 열차의 동역학 해석에 적합한 동역학 모델링 기법을 연구하고 적용였다. 동역학 모델의 공기현가 이론식은 식(2)와 같다. A^*는 면적변화율, P_o는 초기압력, ΔL은 스프링 변위, V_o는 초기변위, γ는 각각 상태변수를 나타낸다. 실제 실험치를 이용한 모델로 수학적 모델링보다는 보다 현실성이 있으면서 모델하기 쉽다는 장점이 있다. 그림 3은 철도차량용 공기현가 장치 모델링을 나타내고 그림4는 그 해석결과는 나타낸다.

$$F_{air} = A^* \cdot P_o\left(1 + \frac{A^* \Delta L}{V_o}\right)^{-\gamma} \qquad (2)$$

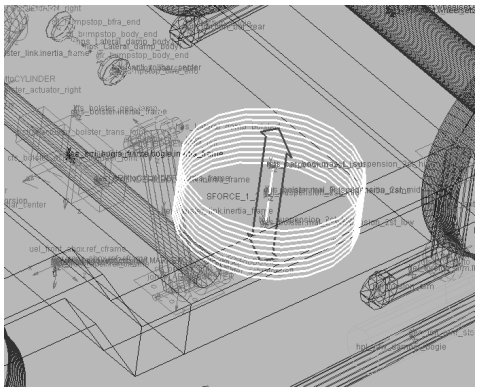


그림 3. 철도차량용 공기스프링(ADAMS 모델)

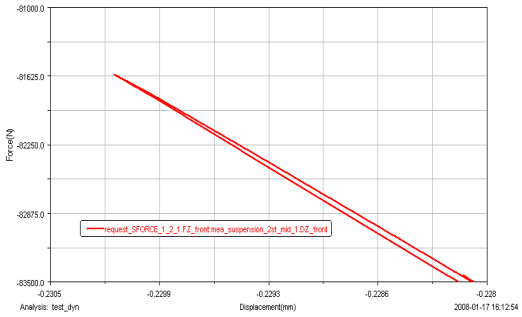


그림 4. 해석 결과

2.2 대차 해석 기술을 통한 모델 개발 및 해석, 안정성 평가

차세대 고속철도 개발에 있어 전체적인 철도차량의 주행성능을 해석하고 요구사항에 맞게 설계하는 것은 승객의 안전과 철도사고 방지에 매우 중요할 뿐 아니라 철도의 안전관리에도 중요한 영향을 미친다. 이를 위해서는 전산기구 동역학 모델링과 그 해석 기술의 개발이 필요하다. 모든 개발 과정을 초기의 제품 개발단계에서 병렬적으로 시뮬레이션 하기 위해 활용됨으로써, 궁극적으로 제품개발기간의 단축과 생산비용의 절감 그리고 제품 품질의 향상에 중대한 역할을 한다. 일반적으로 철도차량의 안정성 분석을 위한 동역학 해석은 그림 5와 같은 프로시저를 따른다. 요구사항에 따라 시나리오를 작성하고 이에 따른 동역학 모델을 완성한다. 이를 해석 후 각종 결과물을 이용하여 UIC 518의 기준에 따라 간접적인 안정성 평가를 할 수 있다. 그림 6는 차세대 고속철 해석을 위한 간단한 동역학 모델링을 보여준다. 기존에 차량의 제원이 확정되지 않았기 때문에 가안에 대해서 해석을 수행하였다. 그림 7은 차량의 대차 모델링을 나타낸다. 그림 8은 UIC 518의 철도차량에 대한 국제 안전기준에 따라서 수행한 해석 결과를 나타낸다. 특별히 그림 8 은 대차의 횡방향 가속도에 대한 안정성 평가 그래프를 보여준다. 그림에서 볼수 있듯이 반경 r2000과 r3000을 가지는 일반적인 선로에서 180km/h로 6.7km 주행하였

을 때 대체적으로 안정적인 주행을 한 것을 볼 수 있다. 향후 차년도 고속철도 차량의 제원이 확정과 더불어 시험을 통한 모델의 신뢰성 확인이 가능할 것이다.

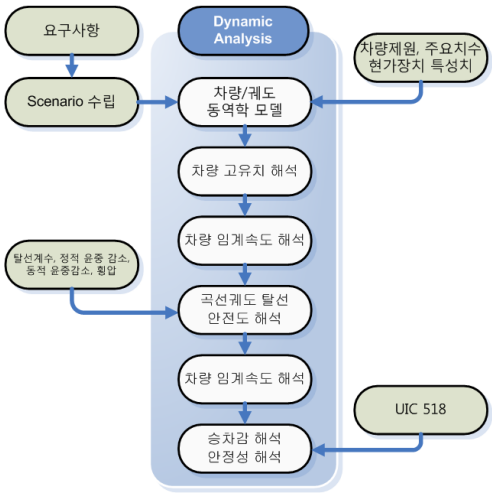


그림 5. 차량안정성평가를 위한 일반적인 프로시저

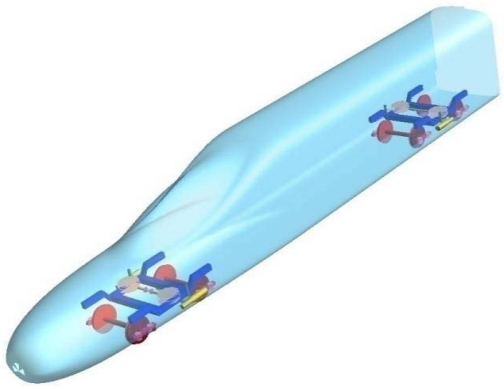


그림 6. 철도차량동역학 모델링

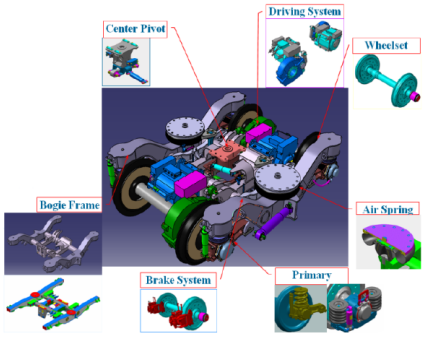


그림 7. 대차 모델링

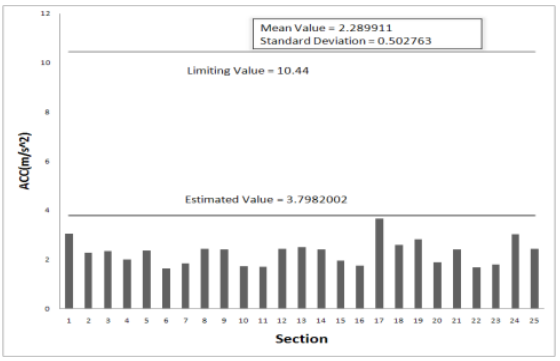


그림 8. UIC518에 의한 대차의 횡방향 안정성평가

2.3 주행시스템 해석 기술 개발

차량의 동역학적인 거동의 종합적인 고려를 위하여 또한 필요한 것으로 휠-레일 접촉요소 개발 및 이를 적용한 주행 모델, 각종 유연체 시스템 해석을 꼽을 수 있다. 대차, 차체 등의 철도차량을 구성하는 모델을 해석하기 위해서 기존의 강체 해석을 위한 직각좌표계와 더불어 모달 좌표계와 절대절점좌표계를 도입하여 차량 파트의 각 시스템에 적용될 수 있도록 하였다. 이것은 기존의 상용프로그램에서 제공하지 못하는 지반, 다리 등의 기초를 포함한 시스템의 해석을 할 수 있게 할뿐 아니라 이것을 통해 전반적인 철도 차량의 동역학적 거동분석과 차량의 안정성 해석 또한 가능할 것이다.

2.2.1 휠-레일 접촉 요소 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 제공되어져야 하는 필수적인 요소이다. 이는 휠-레일과 교량 등의 구조적 특성을 고려한 거동 분석이나 판토와 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 9~12는 일반적인 휠-레일의 자유도와 접촉좌표계를 나타내고 있다. 그림 13과 14는 각각 휠-레일 해석 모듈과 동역학 해석 프로시저를 나타낸다.

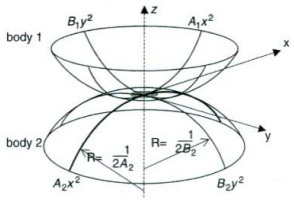


그림 9. 일반적인 Hertz 접촉

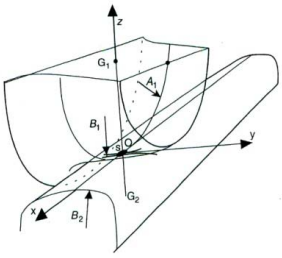


그림 10. 휠-레일의 경우 Hertz 접촉

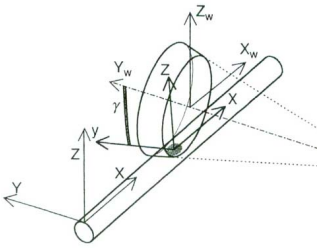


그림 11. 휠셋의 자유도

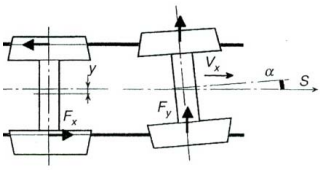


그림 12. 레일,휠의 접촉 좌표계

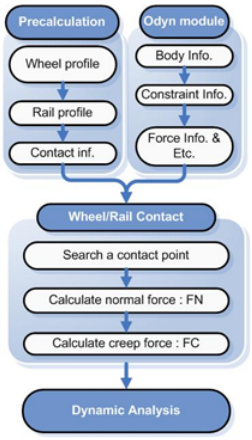


그림 13. 휠-레일 해석 모듈 프로시저 [5]

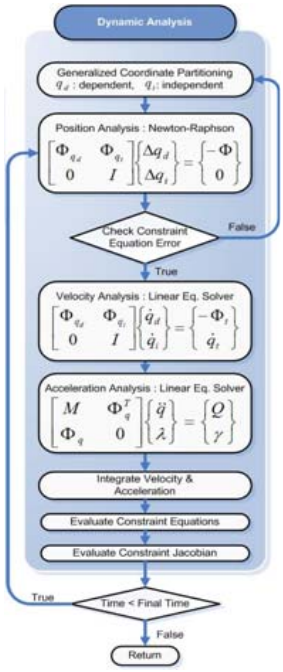
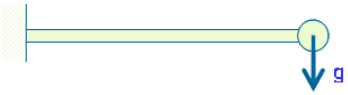


그림 14. 동역학해석 프로시저 [5]

2.2.2 노달 좌표계를 이용한 해석기 개발

다양한 기계분야에서 시스템의 고속화, 경량화로 인한 부품의 잦은 탄성변형(Elastic Deformation)은 제품의 피로파괴를 유발하는 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부품의 탄성변형을 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 빔 요소에 대한 임의의 위치에서의 변형율과 동응력을 동시에 계산할 수 있게 된다 [7]. 그림 15는 외팔보의 물성치를 나타내고 그림 16은 해석변위를 나타낸다.



Body	Data	
FB	2, 6, 8, 12 Beam Elements (Circular Section)	Very Flexible
	Total Mass (kg): 0.0025 Diameter (mm): 1.0 Cross Area (m^2): 7854×10^{9} I (m^4): 4.909×10^{-14} E (GPa): 200.0	
RB	Mass (kg): 0.02 Inertia ($kg\cdot m^2$): 1.58×10^{-6}	Rigid
Ground		Fix

그림 15. Local element coordinates of a beam element

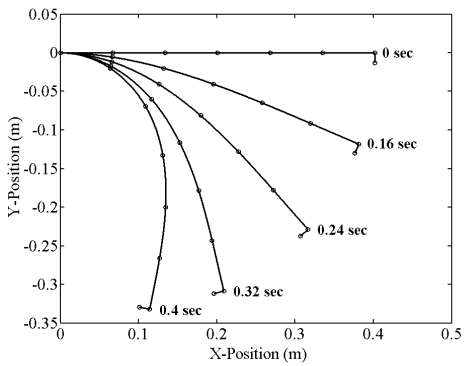
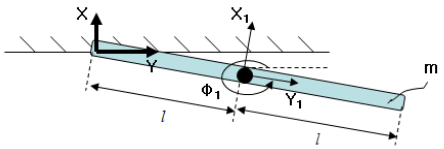


그림 16. Deformation of a beam after a general motion [8]

2.2.3 모달 좌표계를 이용한 해석기 개발



< Initial condition >

$a = 0$

$\Psi_t^1 = [1 \quad 1]$ $\quad \Psi_t^2 = [1 \quad 1]$

$\Psi_r^1 = [100]$ $\quad \Psi_r^2 = [100]$

그림 17 모달좌표계를 이용한 펜들럼 모델

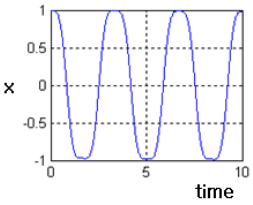


그림 18 x 좌표(m)

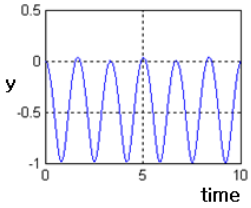


그림 19 y 좌표(m)

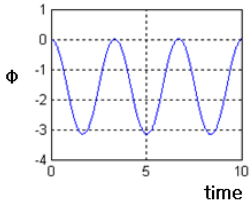


그림 20 모달좌표

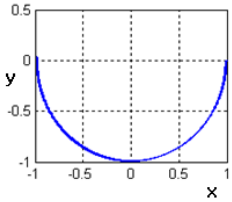


그림 21 x-y trajectory(m)

3차원 공간에서 운동하는 유연체 내부의 임의의 점 i는 식(3)과 같이 표현된다 [9].

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

여기서 A 는 좌표계 변환행렬(Transpose matrix), $\overline{S_i^0}$는 변형전의 위치벡터, $\overline{u_i}$는 변형에 의한 점i의 병진노드 변위이다. 점 i에 대응하는 병진 및 회전 자유도의 변형 모달 행렬은 다음과 같이 표시한다. 그림 17은 모달 좌표계를 이용한 간단한 펜들럼 모델을 보여준다. 이를 바탕으로 그림 18~21은 그에 따른 결과값을 보여준다.

4. 결론

본 과제의 연구를 통해 차세대 고속철도 사업에서 필요한 주행성능 해석 기술 향상과 요소 부품의 해석, 시스템 해석 기술 개발을 할 수 있었다. 세부적으로 동역학 거동 분석을 위한 기초요소인 부시와 공기현가 요소를 개발하였고 이를 바탕으로 간단한 제원을 가진 모델을 상용프로그램을 이용하여 구축할 수 있었다. 그리고 이에 대한 안전성을 판단할 수 있었다. 이에 추가적으로 상용프로그램에서 충족시키지 못하는 지반과 판토를 고려한 동역학 해석을 위해 별도의 동역학 해석기를 개발하고 이에 모달, 노달 좌표계등의 새로운 좌표계 시스템을 도입하고 각각의 예제를 통해 성능을 확인하였다. 개발된 휠-레일 동역학 해석 모듈을 포함하여 향후 종합적인 거동분석을 위한 동역학해석기를 개발하도록 할 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 부싱 모

델링에 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. Yoo, W. S., Lee, S. J., Sohn, J. H., Large Oscillations of a Thin Cantilever Beam: Physical Experiments and Simulation Using Absolute Nodal Coordinate Formulation", Journal of Nonlinear Dynamics, Vol. 34, pp. 3-29, 2003.
9. W.S.Yoo, E.J.Haug, 'Dynamics of Articulated Structures. Part 1. Theory', J.Struct.Mech., 14(1), pp.105~126, 1986.