

차세대 고속철 해석을 위한 휠레일 모듈 개발

The development of wheel-rail contact module for the next generation express train

윤지원† 박태원* 이수호** 조재익**
Yoon, Ji Won Park, Tae Won Lee, Soo Ho Cho, Jae Ik

ABSTRACT

From the view point of railway vehicle dynamics, the interaction between wheel and rail have an huge effect on the behavior of the vehicle. This phenomenon is an unique motion, only for railway vehicles. Furthermore, close investigation of the backgrounds of the interaction is the key to estimate the dynamic behavior of the vehicle, sucessfully. To evaluate the model including flexible bodies such as car body and catenary system of the next generation express train, it is necessary to develop proper dynamic solver including a wheel rail contact module.

In this study, wheel-rail contact module is developed using the general purpose dynamic solver. First of all, the procedure for calculation of the wheel-rail contact force has been established. Generally, yaw angle of the wheelset is ignored. Sets of information are summarized as tables and splined for further uses. With this information, normal force and creep coefficient can be extracted and used for FASTSIM algorithm, which has been shown good reliability over years. Normal force and longitudinal, lateral force at the contact surface are also calculated. Those data are verified by commercial railway simulation program 'VAMPIRE'. This procedure and program can offer a basic process for estimation of the dynamic behavior and wear of the wheel-rail system, even while running on the curved rail. Finally, multi-dimensional inspection tool will be developed including the prediction of the derailment.

1. 서 론

한국형 고속열차는 국내에서는 최초로 최고속도인 352.4km/h를 달성하고, 15만km 시험주행을 실시하고 있다. 또한 이와 더불어 탈팅열차를 개발하여 기존선에서 최고속도 180km/h 주행도 성공한 상황이다. 이에 따라 다수의 원천 기술도 같이 확보된 상황이다. 이를 더욱 발전시키고 국가 철도 경쟁력 향상을 위해서 차세대 고속철도 기술의 개발과 확보가 필요하다.[1] 이를 위해 현재 동력분산식 차량 기술을 가진 열차에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 동력분산식 차량의 개발을 위하여는 추진장치의 경량화와 소형화가 필요하고 소음과 진동을 최소화하기 위한 기술개발 등이 필요하다. 이를 위해 개발된 차량의 시스템 성능을 예측하고 그 안정성과 주행특성을 확인하는 차원에서 프로토타입 제작에 앞서 종합적인 거동 분석을 하는 것이 필요하다. 또한 철도차량의 동역학적 주행안정성과 안전성, 승차감 해석은 객차 내 안전을 위한 것 뿐 아니라 쾌적한 주행조건을 위해서도 필수적인 것이다. 일반적으로 상용틀을 이용한 차량 해석 검증은 일반적인 경우 많은 부분 해석이 가능하다. 현재 가용한 상용틀로는 ADAMS/Rail과 Vampire, Simpack 등이 대표적이다. 이를 통해서 열차의 동특성을 해석하고 그에 대한 결과를 분석해왔다. 하지만 상용틀에서 해석하기 어려운 시스템 중 판토, 가선계, 유연체를 포함한 차체 등은 종합적인 거동해석을 위해서 여전히 새로운 동역학 해석기의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 이미 개발한 동역학 솔버의 플랫폼을 기반으로 하는 휠-레일 모듈을 개발하였다. 차륜/레일의 상호작용은 철도차량의 동역학적 거동에 큰 영향을 미치며 이는 철도에서만 발생하는 고유한

† 책임저자 : 정희원, 아주대학교, 기계공학부, 박사과정

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965

* 정희원, 아주대학교, 기계공학부, 정교수

** 정희원, 아주대학교, 기계공학부

문제가이기도 하다. 더욱이 차륜/레일 상호 작용을 적절하게 규명하는 것은 철도차량 운동을 성공적으로 예측하는 관건이기도 하다. 먼저 휠-레일 접촉힘 구현을 위한 프로시저를 확립하였다. 일반적으로 요각(Yaw angle)이 없다고 가정하였다. 휠-레일 프로파일에서 형상 파라미터를 전차리기를 이용하여 생성하였다. 형상 정보에서 얻은 정보를 정리하여 필요시 보간하여 사용하게 된다. 수직하중과 크립계수를 구하고 이를 통해 지금까지 가장 신뢰성을 지닌 프로그램으로 평가받는 FASTSIM을 통해서 접평면의 힘을 구하였다. 이는 상용 프로그램인 Vampire와의 비교를 통해서 신뢰성을 확보하였다. 이를 통해 차량의 운동 성능 파악, 커브 주행, 차륜/레일의 마모 예측을 위한 기본 프로세스를 확립하였고, 최종적으로 탈선 거동 기술에까지 이용할 수 있는 차륜/레일 상호 작용 계산 방법 및 도구를 개발하게 될 것이다.

2. 휠-레일

2.1 휠-레일의 역사

150여년 동안 휠레일 시스템은 비교적 안정적인 운송수단의 하나로 인식되어 왔다. 다른 것에 비해 높은 안정성을 제공하는 기구 구조 때문에 대부분의 기구 구조들이 자세하게 고려되지 않고 그저 대부분의 사람들은 간단한 미끄럼 구조물로 인식되어져 왔다.

하지만 공학자의 관점에서 봤을 때는 전혀 다르다. 휠-레일 접촉은 매우 복잡하고 불완전한 링크 구조이다. 이것은 매우 높은 집중 하중을 발생시킨다. 원추형의 휠 모양은 휠 셋을 기계구조상 매우 제한된 형태의 운동만을 하게 한다. 부분적으로 미끄럼 구조를 가지고 있지만 앞뒤로만 움직일 수 있도록 제한되게 하는 것이다. 접촉면은 롤러 베어링과 비슷한 거동을 보이지만 먼저, 비, 모래, 심지어는 철도에 가는 자갈에 대해 아무런 보호가 없이 노출된 채로 접촉현상이 일어난다.[2]

좀더 자세히 보면 철도차량의 안정성은 몇 가지 예방만 한다면 굉장히 높게 유지할 수 있다. 이번 장을 통해서 차세대 고속철의 종합적인 동역학 해석 평가 시스템에 중요한 기초 역할을 하게 되는 이론식 유도 및 관련 예제 해석에 관해 설명한다. 역사적으로 휠-레일의 종방향 접촉 힘의 첫 이론 모델은 미국의 Carter에 의해서 제시되었다. 최근에 영국의 Johnson과 네델란드의 Kalker가 더 정확한 접촉현상을 기술하는 이론을 제시했다.

먼저 연속 접촉력 모델(A Continuous Contact Force Model)에 대해서 간단히 생각해보면 두 물체가 접촉할 때, 변형은 접촉력에 의해 접촉 영역에서 국부적으로 발생하게 된다. 접촉력과 두 물체 사이의 상호 변형 사이 관계에 대한 결정은 연속 분석(Continuous Analysis)에서 매우 중요한 단계에 해당된다. 일반적으로 충돌 접촉은 압축양상과 반발양상의 두 가지 양상으로 발생하게 된다. 압축되는 과정 동안 두 물체는 접촉하는 면의 수직 방향으로 변형이 되고, 수직 방향으로 두 물체 위의 접촉점에서 상호간 속도는 '0'으로 감소하게 된다. 압축 과정의 후반부는 최대 압축 정도와 최대 접근 정도를 보여준다. 반발 과정은 이때부터 두 물체가 최종적으로 분리될 때까지 진행되게 된다.[3]

2.2 이론식

휠과 레일간의 접촉력에 관한 이론은 오랜 기간 연구된 만큼 많은 연구자료들이 산재한다. 때문에 대표적으로 거론되는 휠-레일의 이론에 대해서 논하고자 한다.

휠과 레일간의 접촉력은 철도 차량의 안정성 및 승차감과 같은 철도 차량의 동적 거동에 지대한 영향을 미치므로 접촉점의 정확한 위치와 정확한 접촉력의 계산을 위한 기술의 개발이 요구된다. 휠과 레일간의 접촉에 의한 상호작용은 철도 차량 운동에 큰 영향을 미치며, 이는 철도 차량에서만 발생하는 고유한 문제이기도 하다.[4] 따라서 휠과 레일 상호작용을 정확하게 규정하는 것은 철도 차량 운동을 성공적으로 예측하는 관건이기도 하다. 휠과 레일 상호 작용은 크게 휠과 레일의 기하학적인 문제와 접촉면에서 발생하는 크립(creep) 역학 문제로 크게 나뉜다.

철도 차량이 궤도상을 주행 할 때 대차와 저널박스를 통해 연결된 휠들은 그 기하학적 구조로 인해 순수 구름(pure rolling) 운동을 일으키지 못하며, 휠과 레일 사이에는 크립 또는 슬립(slip)이 일으키게 된다. 이때 현가장치 스프링의 강성이 작으면 슬립보다는 크립이 주로 발생하게 된다. 크립이란 휠과 레

일 두 접촉면 사이의 상대속도를 의미하며 이를 휠의 주행방향 이동속도로 나누어준 값을 크리페이지(creepage)라 한다. 이 때 크립 힘(creep force)은 휠과 레일의 접촉력 중 접촉면 내의 성분인데 휠과 레일이 모두 강제라면 크립은 미끄럼에 의한 것뿐이며 이 경우 크립 힘은 쿨롱 마찰력이 된다.[5]

크립과 이에 의한 철도 차량 횡방향 진동의 안정성 문제가 Carter에 의해 처음으로 제기되었다. Johnson등은 스핀 크립(spin creep)이 고려되지 않은 크립과 크립힘 사이의 비선형 관계식을 유도하였다. Kalker는 스핀 크립까지 고려한 정해(Exact solution) 및 단순해(Simplified solution)에서 접촉면에서의 수직응력 분포와 접선 방향 응력-변형률 사이의 관계를 단순화시켜 기존 계산방식에 비해 계산량을 90% 가까이 줄였다. 접촉면에서 국부적인 미끄럼이 발생되지 않을 경우 크립과 크립힘 사이의 관계는 선형이 된다. 여기서 유도되는 관계식은 Hertz의 접촉 이론에 근거를 두고 있으며 이는 두 접촉하는 접촉 물체의 곡률반경, 재료의 탄성 특성 함수, 수직 하중으로 주어진다. Shabana등은 Lankarani와 Nikraveshe에 의해 연구된 연속 접촉 모델의 연장선 상에 있는 탄성적 접촉 방법을 통해 휠과 레일 사이의 접촉력을 구하였다. 휠과 레일 사이의 미소 침투량과 침투 속도를 계산하고 Hertz의 접촉이론을 통해 수직 접촉력을 얻어내어 이를 다시 Kalker의 이론에 적용하여 크립과 크립힘을 산출해 낸다. 탄성적 접촉 방법은 실제 휠과 레일의 상호 작용을 근접하게 표현할 수 있으나 휠과 레일의 상호 침투량이 매우 작은 변위 값을 갖더라도 그에 따라 매우 급격한 접촉력의 변화를 보이는 한계를 가지고 있다.[6] 그 이외에도 Shabana등은 탄성적 접촉 방법뿐만 아니라 구속적 접촉 방법을 통해 휠과 레일의 상호 작용에 대한 동적 해석을 수행하였다. 휠과 레일의 표면 매개변수식을 이용하여 구속식을 구하고 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)를 이용하여 구속력을 계산하여 최종적으로 크립과 크립힘을 계산한다.[7, 8] 구속식을 이용하여 접촉을 표현하기 때문에 철도 차량의 탈선과 같이 휠과 레일의 분리 시에 대한 고려가 필요하지만 탄성적 접촉 방법에 비해 휠과 레일 사이에 침투가 발생하지 않고 급격한 접촉력의 변화가 적어 안정적인 결과를 도출하였다.[9] 철도차량의 동적 모델에 적용시킬 수 있는 기반을 마련하고자 이번 연구를 통해서 여러 가지 이론들을 정리하고 이미 개발된 통합 동역학 시스템에 어울리는 이론을 택하여 가장 효과적으로 휠-레일 접촉힘을 표현하려 하였다. 본 논문에서는 크게 휠-레일의 가장 기본적인 가정과 그에 따른 관련 식의 유도과 적용범위를 살펴보고 가장 많이 쓰이는 Kalker의 FASTSIM에 대한 식을 유도하고 관련 함수를 작성하여 사용프로그램에 그 가용성을 확인하였다.

2.3 휠-레일 모듈의 구성

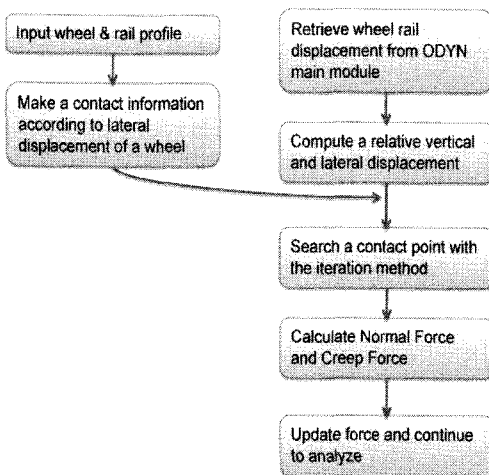


그림1. 휠레일 모듈 프로그램 순서도

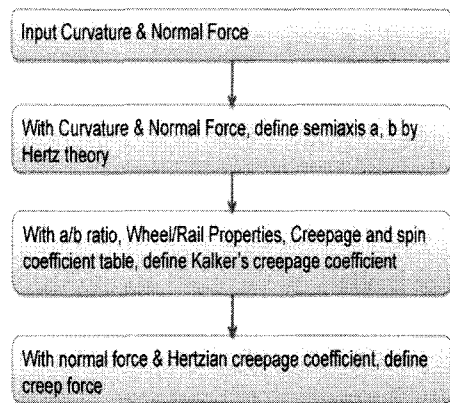


그림2. FASTSIM 모듈 구성

그림1과 같이 먼저 휠-레일 프로파일에 대한 파라미터 추출과 동역학 해석기에서 추출한 현재 물체(body)정보를 통해 슬립률과 현재 접촉점의 위치를 계산해내고 그것을 통해서 크립힘을 계산해서 다시 동역학 해석기에 값을 돌려주는 구조로 생성하였다. 그림2는 FASTSIM 모듈의 순서도를 보여준다. 예

제로는 그림3과 같이 잘 알려진 틸팅차량의 휠-레일 프로파일을 이용하였다. 이것을 통해서 좌우 휠과 레일의 접촉점 위치, 회전 반경, 롤각도, 횡방향 변위에 대한 휠과 레일의 곡률, 접촉각 등을 계산한다. 이 정보를 찾기 위해서 탈선이 없다고 가정하고 형상정보에 의한 기하학적 정보를 찾는 프로그램을 작성하였다. 접촉점 검색 알고리즘은 그림4와 같이 해석 때마다 횡방향 검색 방향에 대해서 가장 짧은 거리를 가지는 곳에서 접촉이 일어난다고 가정하였다. 또한 그림5와 같이 추출한 정보를 정리해본 결과 상용프로그램과 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

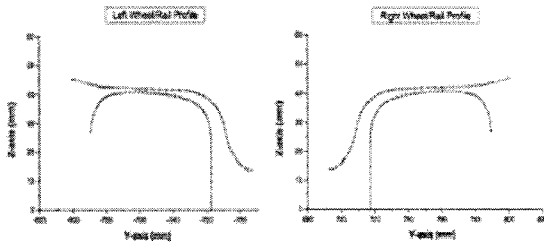


그림3. 틸팅차량의 휠-레일 프로파일

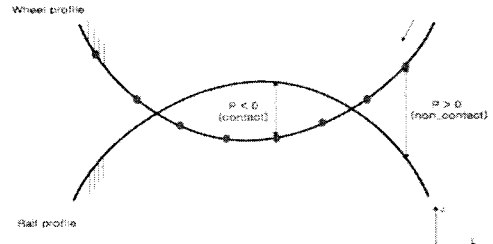


그림4. 접촉점 검색 알고리즘

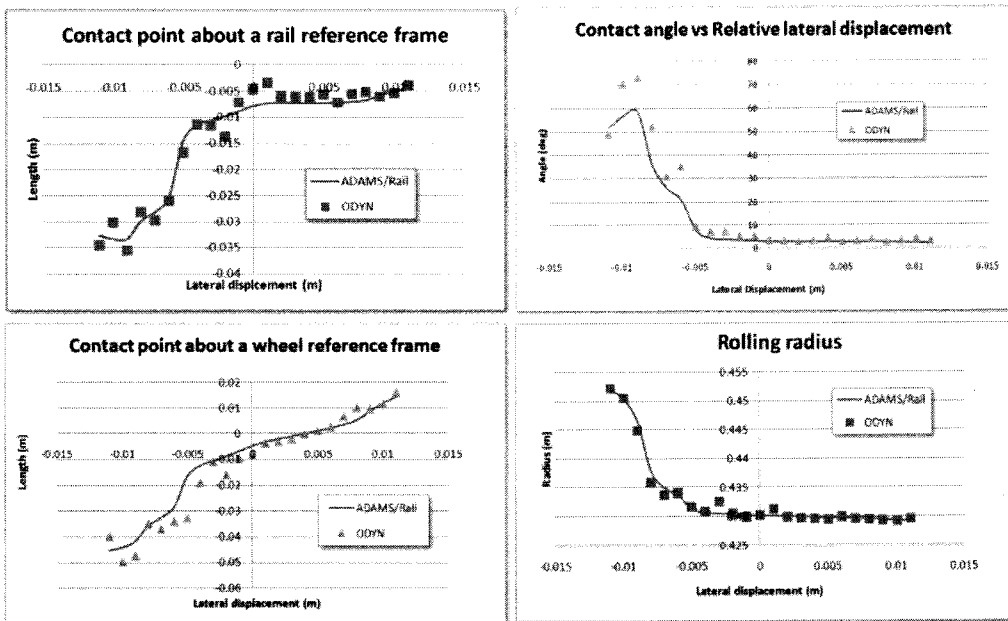


그림5. 휠-레일 형상에서 추출한 정보

3. 동역학 모델링

3.1 차량 모델링

차량모델링은 그림6과 같이 진행하였다. 전체 차량 해석이 아니라 휠-레일 모듈의 테스트를 위해서 대차만을 모델하였고 휠셋은 1.8톤, 대차는 4.3톤으로 틸팅대차의 데이터를 이용하였다. 레일은 그림7과 같이 모델하여 직선부와 곡선부를 적절히 운행하여 결과를 도출하였다. 차량은 10m/s의 저속으로 운행하도록 하였다.

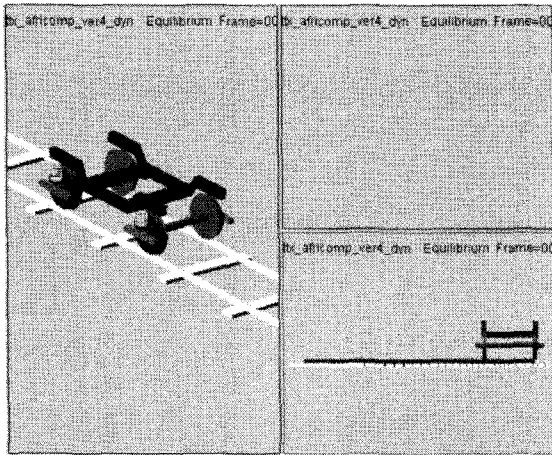


그림6. 동역학 모델링

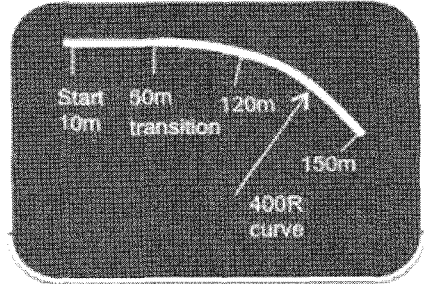


그림7. 레일 모델링

3.2 해석 결과

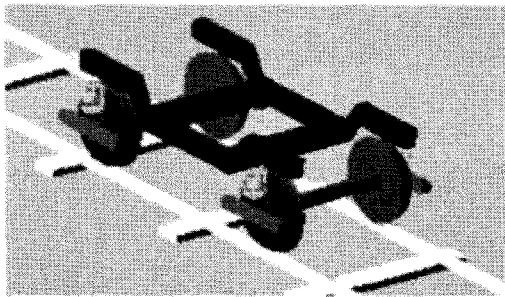


그림8. 틸팅 대차 수직력

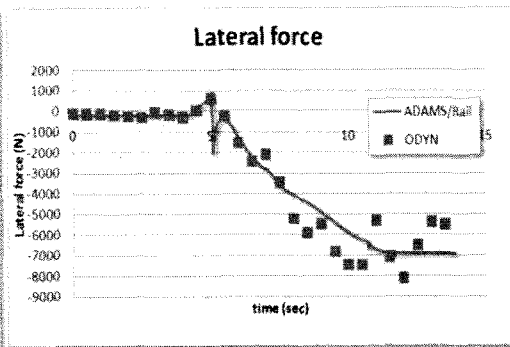
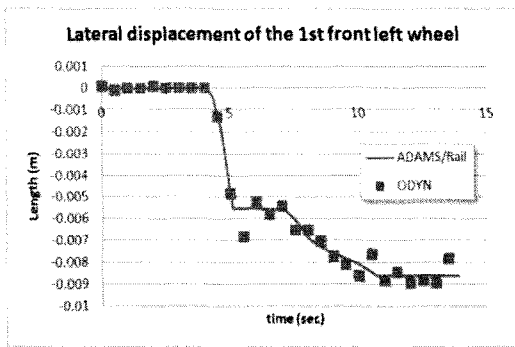
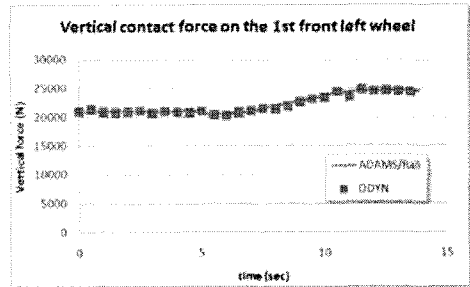


그림9. 틸팅대차의 횡방향 변위와 횡력

그림8과 9와 같이 틸팅 대차를 이용한 해석시 상용프로그램과 대부분 일치하는 결과를 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 차세대 고속철도 개발 사업의 일환으로 이미 개발된 동역학 해석기를 통해서 휠-레일 모델을 삽입하고 그것의 결과를 확인하였다. 휠-레일 접촉력 계산을 위해서 문헌들을 통해서 이론식을 유도하였다. 예제파일로 틸팅차량의 휠-레일 프로파일을 이용하여 접촉력 계산을 위한 형상정보를 횡방

항 변위에 대해서 테이블화시켰다. 이를 통해서 FASTSIM 알고리즘을 이용하여 횡방향힘을 구하였다. 철도차량의 대차를 모델링하여 상용프로그램과의 비교를 통해서 신뢰성을 확보하였다. 이 프로그램은 차세대 고속철도 차량 해석을 위해 차후 통합 시스템 해석과 더불어 다양한 차량 동특성해석에 이용할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김기환, 박찬경, 김석원 (2006), “차세대 고속철도기술개발사업 추진방향” , 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp.7~12.
2. Joao C. Pombo, Jorge A. C. Ambrosio, *Multibody System Dynamics* (2008), ‘Application of a wheel-rail contact model to railway dynamics in small radius curved tracks’ , pp.91-114.
3. Ahmed A. Shabana, Jalil R. Sany, *Nonlinear Dynamics* (2001), “A Survey of rail vehicle track simulations and flexible multibody dynamics”, vol. 26, pp.179-210.
4. Jose L. Escalona, Manuel Gonzalez, Khaled E. Zaazaa, Ahmed A. Shabana (2003), “A technique for validating a multibody wheel/rail contact algorithm”, *Proceedings of DETC '03, ASME 2003 DETC*, Chicago, Illinois Sep, 2-6, 2003
5. Susanna Papini (2006), “A numerical 3D model of rail wheelset dynamics”, *Communications to SIMAI Congress*, ISSN 1827-9015, Vol. 1.
6. Joao C. Pombo, Jorge A. C. Ambrosio (2006), “A hertzian contact formulation for the wheel-rail contact problem in railway dynamics”, *III European conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering C.A. Mota Soares etal*, Lisbon, Portugal, 5-8.
7. Jorge A. C. Ambrosio, Joao C. Pombo (2003) “A new approach to study the wheel-rail contact problem in railway dynamcis”, *IDMEC*, Lisbon, Portugal.
8. Joao C. Pombo, Jorge A. C. Ambrosio (2005), “Dynamic analysis of a railway vehicle in real operation conditions using a new wheel-rail contact detection model”, *International Journal of Vehicle systems modelling and testing*, Vol. 1, No, 1-3, pp.79-105.
9. Ahmed A. Shabana (2004), “Development of elastic force model for wheel/rail contact problems”, *Journal of Sound and vibration* vol. 269, pp.295-325.