

350km/h 급의 유지보수용 주행시험기의 개념설계 및 동적모델 제시 연구

A Study on Conceptual Design and Dynamic Model of Roller Rig for Maintenances with Maximum Speed of 350km/h

구준성* 신광복**† 류봉조*** 이대봉**** 이은규****
Goo, Jun-Sung Shin, Kwang-Bok Ryu, Bong-Jo Lee, Dae-Bong Lee, Eun-Gyu

ABSTRACT

Roller rigs have been built widely to study and evaluate the dynamic behaviors of railway vehicles, and they have particularly been applied to the development and routine maintenance of high-speed trains. However, there is no roller rig for routine maintenances of high speed train in Korea, although high speed train is running on the lines. Therefore, it is very important issue to check and evaluate the dynamic responses of high speed train after several years of operation. This paper presents a study on the conceptual design and dynamic model to develop the roller rig for the routine maintenances of high speed trains. The roller rig has two independent electronic motor and maximum speed of 350km/h, which can simulate running on straight and curved track. CATIA V5 was used to design the 3D geometrical models and ADAMS was used to verify and analyze the dynamic behaviors of roller rig.

1. 서 론

주행시험기(roller rig)는, 궤조륵이라 불리는 레일에 해당하는 회전원반상에 차량 또는 대차를 설치하여 주행상태를 재현하는 장치로써, 철도차량의 사행동, 주행안정성 및 주행성능에 대한 특성을 파악하는데 목적이 있다. 중국의 경우 1980년에 50~70 km/h의 속도를 구현하던 철도가 주행시험기의 활용으로 인해 1990년에는 140~160 km/h의 속도로 향상되었다[1]. 이에 비해 국내의 경우 수십억원의 비용을 투자하여 주행시험기를 개발하여도 실용성 측면에서 매우 낙후된 현실이다. 50여억원의 비용을 투자하여 제작한 연구개발용 주행시험기가 철도연구원에 설치되어 있다. 그러나 상업운행 중인 대차의 경우 5~6년 주기로 유지보수 측면에서 중수검사를 실시하여야 하는데, 연구 개발용의 주행시험기로는 KTX와 같은 고속철도 차량에 대한 중수검사를 실시할 수 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 350 km/h급의 고속화된 철도차량의 임계 속도에 따른 주행안정성과 구조결함에 대한 평가가 가능한 유지보수용 주행시험기에 대한 개념 설계안을 제시 하고자 한다. 주행시험기의 설계사양으로는 대차 한 대분량의 주행상태를 구현하도록 하였으며, 국내 대차의 경우 축간격이 일정하지 않는 점을 고려하여 후두부 궤조륵이 이동 가능하도록 설계하였다. 철도차량 대차에 대한 주행 안정성 평가는 유지보수용 주행시험기에서 직선주행과 곡선주행만을 모사하여 제작비용을 절감하도록 하였다. 계측시스템으로는 대차의 변형상태를 측정하기 위한 변위센서와 고유진동수를 측정하기 위한 가속도 센서, 휠과 휠 축의 연결 베어링 상태를 측정하기 위한 온도센서를 고려할 것이다. 또한, 차륵과 궤조륵간의 접촉 알고리즘(contact algorithm)에 대한 평가와 주행시험기 구동에 필요한 동력원 선정에 대한 설계(안)을 제시하였다.

* 한밭대학교, 기계설계공학과, 경량구조 및 CAE 실험실

**† 교신저자, 한밭대학교, 기계설계공학과, 교수, 정회원(e-mail: shin955@hanbat.ac.kr, Tel:042-821-1156)

*** 한밭대학교, 기계설계공학과, 교수, 정회원

**** (주)우진산전, 기술연구소, 정회원

2. 주행시험기 제원

본 연구에서 제시된 유지보수용 주행시험기는 새마을호, KTX에 사용되는 대차의 주행안정성 평가가 가능하도록 하였다. 실제 대차의 운행조건을 고려하여 레일의 역할을 하는 롤러(roller)부는 국제 규격인 UIC-60을 기준으로 설계하였으며, 동특성 평가용 시험대차는 1차 현가장치로는 원통형 코일스프링, 2차 현가장치로는 에어백 공기스프링을 사용하였다. 한 대 분량 철도차량에 대하여 350 km/h의 주행시험이 가능한 출력선정에 있어서 1500 kW의 모터를 사용하였다[2]. 상세한 유지보수용 주행시험기의 주요제원은 표 1에서 볼 수 있다.

표 1. 주행시험기 제원

구 분	명 칭	수 량	치수 및 사양	용 도
전력공급 장치	전폐 농형 전동기	2 EA	1500kW, 3300V, 3581rpm	롤러 구동 전력 전달
	감 속 기	4 EA	감속비 1:2	전/후면 동력전달 연결
구동 장치	롤러구동 축	4 EA	φ 135mm	롤러 지지
	원형레일 롤러	4 EA	φ 1370mm	철도차량 대차 구동
축 연결 / 지지 장치	자동 조심 로울러 베어링	8 EA	22224EAE4	롤러구동 축 지지
	이구경형 플러머 블럭	8 EA	SN224	베어링 고정
	프렌지 커플링	6 set	내경 φ 140mm	롤러와 축 고정
	유니버설 커플링	4 set	L 1390mm	축간 동력전달
	디스크 유연 커플링	4 set	내경 φ 70-80mm	모터/기어박스와의 연결
		4 set	내경 φ 80-100mm	모터/기어박스와의 연결

2.1 개념설계안

일반적으로 주행시험기의 경우 대차 1세트의 주행성능 시험을 하는 것이 보편적인 점을 고려하여 본 연구에서 설계된 주행시험기는 대차위에 더미(dummy)를 얹어 대차만의 주행성능을 평가하거나 차체와 대차가 결합된 상태에서도 시험 가능하도록 하였다. 궤도간격은 국내에서 사용되고 있는 레일의 규격에 따라 1435 mm으로 선정하였다. 국내 철도차량인 새마을호, KTX 등의 경우 축간거리가 일정치 않은 점을 고려하여 2100~3600 mm로 가변적으로 설정하였다. 축간거리를 조정하는 방법은 전두부 감속기로부터 프렌지 커플링(frange coupling)을 사용하여 일정 간격에 동력을 전달한 후 축간 거리에 따라 유니버설 커플링(universal coupling)을 변경하는 방법을 고안하였다. 개념 설계된 주행시험기에 철도차량을 설치한 조감도는 그림 1에서 나타내고 있다. 그림 2에서는 주요 구성도(①:플러머 블럭, ②:구동 모터, ③:감속기, ④:롤러, ⑤:축 가변장치)를 나타내고 있다.

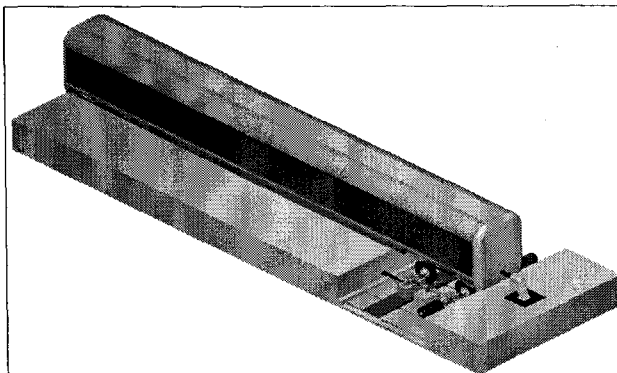


그림 1. 주행시험기 조감도

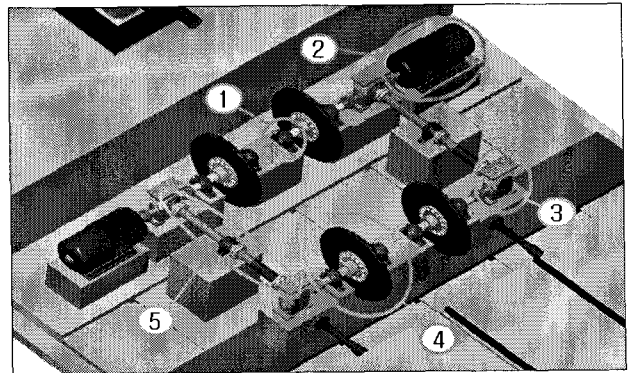


그림 2. 주요 구성도

주행시험기를 설계함에 있어서 대차를 구동시키기 위해 롤러를 지지해주는 축의 선정은 매우 중요하다. 본 연구에서 주행시험기의 경우 롤러 하나당 축에 작용하는 하중은 6 ton이고, 회전 토크는 4110 kg/m가 작용하므로, 식(1)의 회전축에 대한 지름을 구하는 공식에 의해, 지름이 135 mm의 축을 선정하였다. 또한, 선정된 축에 대한 구조해석을 실시한 결과 안전한 것으로 평가되었다.

$$d = \sqrt[3]{\frac{5.1}{\tau_a} \sqrt{(k_m \times M^2) + (k_t \times T^2)}} \quad (1)$$

여기서, d 는 축 지름, τ_a 는 비틀림 강도, k_m 는 모멘트에 작용하는 동적하중 계수, k_t 는 토크에 대한 동적하중 계수, M 는 최대 휨 모멘트, 그리고 T 는 회전토크를 의미한다. 그 외 베어링(bearing), 플러머 블록(plummer Block), 커플링(coupling), 감속기 선정은 축의 지름에 적합한 규격에 의해 선정하여 설계하였다. 주행시험기 주요 파트에 대한 평면도와 측면도는 그림 3에 나타냈다.

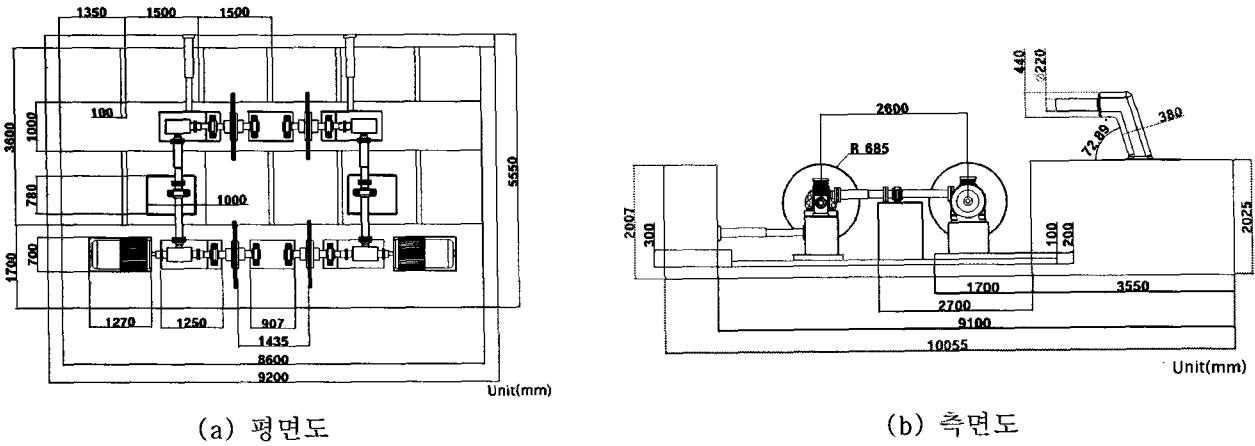


그림 3. 주행시험기의 평면도 및 측면도

본 연구의 주행시험기는 유지보수용이기 때문에 그에 따른 시험항목으로는 대차의 좌우 가진특성, 소음, 온도, 구조적 결함에 대한 데이터를 확보하는데 목적을 두고 있다. 이에 따른 검사종류와 측정 방법은 표 2에 나타내었다.

표 2. 유지보수용 주행시험기의 검사 종류 및 측정 방법

검사 종류	측정 방법	목적
좌우 가진	작은 회전 롤러를 회전하는 휠 측면에 부착하여 변위 측정	철도차량의 탈선계수 확립
진동	대차 및 차체 중앙에 가속도계를 설치하여 상하진동을 측정	레일의 설치의 방법 제시
소음	시험 차량 측면에 소음계를 설치하여 발생 소음을 측정	작동시 발생하는 소음 최소화
온도	열전대를 차축상 커버에 설치	차축의 온도 상승 범위 파악 및 기준설정

2.2 주행시험기의 동적 안정성 평가

시험대차는 H형 구조의 대차 프레임 모델로 하여 설계하였고, 롤러에 의해 구동되는 현상을 파악하기 위해 1차 현자장치만을 구현하였다. 휠과 롤러의 접촉알고리즘은 참고문헌 [3]에서 제시된 모델을 적용하여, 접촉방식은 "Solid to Solid"를 사용하였다. 주행시험기의 동적 안정성 검증을 위해 적용된 설계변수 및 적용 변수는 표 3과 4에 나타냈다.

표 3. 해석대차 제원

구 분	제 원
대차 형식	H형 대차프레임
축 중	11 ton
차륜 직경	860 mm
가속도	0.591 km/h/s
감속도	3.31 km/h/s
궤도 간격	1435 mm
축간 거리	2600 mm
최소곡선반경	7000 m
최대 속도	350 km/h

표 4. 차륜접촉 변수

접촉 변수	값
Stiffness	5.0E10 N/mm
Force Exponent	1.5
Damping	0 N-sec/mm
Statics Transition Velocity	100 m/sec
Friction Transition Velocity	1000 m/sec
Statics Friction Coefficient	0.7
Dynamic Friction Coefficient	0.45

본 연구에서는 유지보수용 주행시험기에 대한 개념설계의 동적 안정성 검증은 ADAMS를 사용하였으며, 대차에 대한 동특성보다는 주행시험기 자체 연결부에서의 작동 시 발생하는 변수들에 대한 평가에 중점을 두었다. ADAMS를 이용한 동적 검증에서는 입력된 변수들에 의해 차량모델의 적합성과 대칭성을 판단할 수 있었으며, 각각의 파트별 변위, 속도, 가속도, 운동에너지, 발생 토크 등을 확인하였다. 이러한 데이터들은 철도차량의 구조적 안전성, 동적 안정성 및 승차감의 정보를 확인할 수 있을 것이다. ADAMS에 사용된 주행시험기의 동적 모델은 그림 4에서 나타냈으며, 주행시험기에 사용한 조인트의 종류 및 수량에 대해 표 5에 나타내었다[4].

표 5. 동특성 해석 변수

조인트 종류	수 량
Revolute joint	20
spherical joint	8
Transnational joint	2
Universal joint	2
Fixed joint	10
Gear joint	4
Motions	2

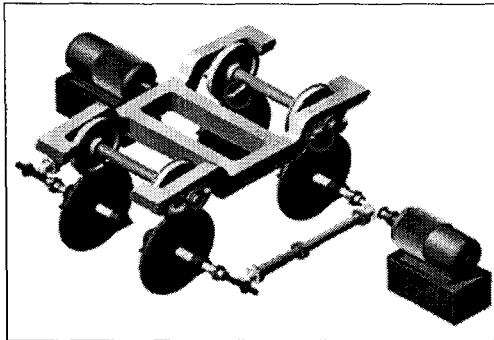


그림 4. 동특성 해석 모델

가상 대차를 사용하여 롤러의 구동에 의한 휠의 주행특성을 확인하였다. 초기구동 시 휠의 좌우가진 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 휠의 속도가 540 km/h 이후 지점부터 좌우가진이 크게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 요구하는 최대 속도가 350 km/h인 점을 고려하였을 때 주행시험기는 안정적인 것으로 나타났다. 또한 휠과 롤러간의 초기 좌우가진은 주행시험기를 가동함에 있어 초기 공급되는 출력을 선정하는데 중요한 역할을 할 것이다. 이러한 현상은 각 휠마다 레일과의 접촉에 대한 마찰 및 레일의 불규칙성에 따라 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다. 롤러에 의해 구동되는 휠에 발생한 좌우가진에 대한 그래프는 그림 5에 나타냈으며, 주행에 따른 각속도 그래프는 그림 6에 나타냈다.

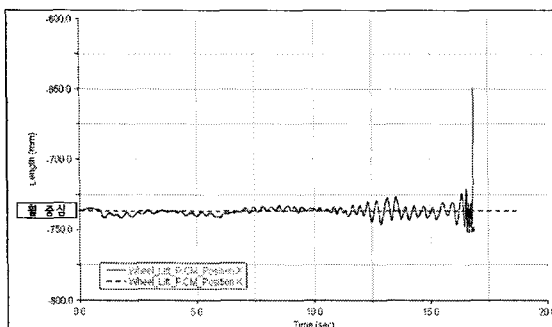


그림 5. 휠의 좌우가진 그래프

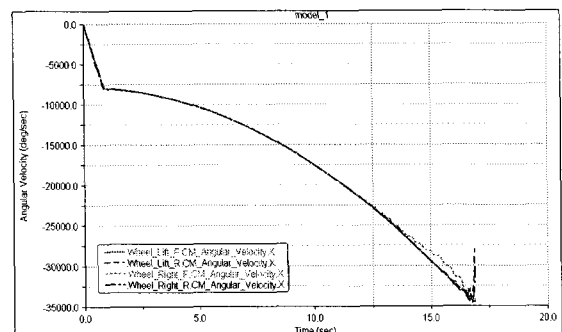


그림 6. 휠의 주행 속도 그래프

3 결론

본 연구에서는 국내철도차량 대차의 중수검사를 위한 유지 보수형 주행시험기에 대한 개념설계안을 제시하였다. 국내 철도차량의 대차는 종류에 따라 축간거리가 일정치 않은 점을 고려하여 주행시험기의 축간거리 변경이 가능한 모델을 설계하는데 중점을 두고, 두 축간의 거리변경과 함께 동력전달도 가능한 모델을 제시하였다. 이로 인하여 사용되는 동력모터가 2개로 제작에 드는 비용절감 효과를 거둘 수 있을 것이다. 동특성 평가를 실시함에 있어 현재 고속철도 차량 대차에 대한 자료가 없는 관계로 ADAMS를 통하여 설계된 시험 대차의 주행특성을 평가해 본 결과 350 km/h의 속도에서 주행시험기의 가동은 안정적인 것으로 평가되었다. 추후 고속철도차량용 대차에 대한 자료가 수집된다면 대차의 사양에 맞춘 설계를 하여 계속해서 연구를 진행할 것이다. 또한, 주행시험기의 동적 특성에 대한 평가에 이어 주행시험기의 구조적 안전성도 연구할 것이다. 본 연구를 통해 철도차량의 레일과 휠 간의 접촉에 대한 연구가 더욱 이루어져야 할 것이라 사료되었으며, 무한궤도레일을 설계하여 부분마다 크랙을 가해 그 상황에서의 주행특성을 평가해 볼 예정이다. 빠른 시일 내에 유지보수용 주행시험기가 국내에서 개발되게 된다면 가상 주행시험기와 실제 주행시험기 간의 수치해석 평가가 가능해 질 것이다. 실제 주행시험기에서 얻어진 값을 통해 동적해석 프로그램에 사용될 여러 변수에 대한 데이터가 구축되어 정확한 가상평가가 가능해 질 것이다.

참고문헌

1. Simon Iwnicki, "Handbook of Railway Vehicle Dynamics"
2. 정훈, 김진태 “한국형 고속전철용 개발대차의 주행시험대에서 주행성능평가”
3. 양도철, 최성규,(2004), “철도 차량 Virtual Engineering 기술개발”, 철도시스템 선진화 기술연구 사업 KRRR 연구 04-88
4. 조연호, 이강운, “ADAMS/Rail을 이용한 철도 차량 동특성 해석”