축소형 차량의 횡진동 해석
Lateral Vibration Analysis of a Small Scale Railway Vehicle Model

이승일*, 손건호**, 최연선***
Seung-Il Lee, Gun-Ho Son, Yeon-Sun Choi

ABSTRACT

The vibration of a running vehicle can be classified on lateral, longitudinal and vertical motions. The important factor on the stability and ride quality of a railway vehicle is the lateral motion. The contact between wheel and rail with conicity influences strongly on the lateral motion. In this study, an experiment for the vibration of a running railway vehicle was performed using a small scale railway vehicle model. Also, the effects on the car body, bogie and wheelset were examined for the weight and the stiffness of the first and second suspension. The experimental results showed that the lateral vibration increases as the wheel conicity and stiffness of the second suspension increase. And the lateral vibration of the bogie increases as the mass ratio between car body and bogie increases. Also, the lateral vibration of the wheel becomes high at low speed, while the wheel of 1/20 conicity makes severe vibration at high speed running.

1. 서론

철도차량의 동적해석은 차량의 안정성, 승차감을 향상시키고, 차륜과 레일의 마모를 감소시키는데 그 목적이 있다. 차량 주행 중에 발생되는 진동은 전후·좌우·상하 진동이 조합되는 형태로 존재하나 차량의 안정성 해석에 중요한 영향을 미치는 요소는 횡진동이다. 차륜과 레일이 접촉하며 주행하는 철도차량의 차륜답면 형상은 횡진동의 크기에 영향을 미친다[1]. 횡진동이 증가하면 차륜과 레일사이에 미끄럼이 생기고, 접촉점에서 크리이프력이 작용하게 되고 주행속도가 임계속도까지 올라가게 되면, 헌팅(hunting)이 발생하여 주행 안정성을 보장할 수 없게 된다[2]. 철도차량 동적해석에는 주로 실차 실험과 컴퓨터를 이용한 전산해석을 수행하지만 비용과 시간적인 어려움과 제약이 따르므로 축소형 차량모델실험으로 실제 철도차량의 동적특성을 대신 평가할 수 있다[3]. Yabuno[4]는 축축모형 주행실험장치를 이용하여 윤축의 헌팅운동에 대한 안정성 시험하였고, 최경산[5]은 축소형 차량모델 실험장치를 이용하여 공기스프링과 차체질량이 철도차량의 상하진동에 미치는 영향을 검토하였다. Dukkipati[6]은 화차모델 실험장치를 이용하여 차륜반경, 원호각, 캔트에 따른 차량모델의 헌팅속도를 실험하였고, 이를 철도차량 동특성 해

*1 정회원, 한국철도대학 차량기계과
*2 학생회원, 성균관대학교 대학원 석사과정
*3 정회원, 성균관대학교 기계공학부, 교수

석 시뮬레이션 프로그램으로 검증하였다. 본 연구에서는 실차와 유사한 상태인 축소형 차량모델을 이용하여 차륜답면 형상변화에 따른 실험을 수행하였다. 또한 설계변수인 차체질량과 2차 강성값의 변화가 차체, 대차와 윤축의 진동특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 축소형 모형실험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 축소형 차량모델은 Fig. 1과 같이 차체와 대차로 구성되었다[5]. 1, 2차 현가장치를 이용하여 축상, 대차 프레임, 차체를 조립하였고, 1차 현가계는 코일스프링, 2차 현가계는 고무 스프링을 사용하였다. Table 1은 축소형 차량모델의 주요 제원이다. 사행동 축소모형 실험에서는 기하학적 상사법칙과 함께 차륜, 레일접촉면에 있어서 동적 상사법칙으로서 E/σ (E : Young"s modulus, σ : 응력), μ (마찰계수)를 모형과 실차에서 같게 할 필요가 있고[3], 차체 횡진동 축소모형 실험에서 가진실험과 강체진동 응답배율이 1/3~1/5이지만 축소형 차량모델 크기의 제약을 받으므로 실차의 약 1/15, 축소형 차량모델의 질량은 실차의 약 1/750로 하였다. k_1 = 272.11 N/m, k_2 = 40.07 N/m로 하여 강성비가 κ = 0.147이고, 축소형 차량모델의 차체 질량은 m_c = 19.36 kg, 대차 프레임 질량은 m_b = 2.943 kg으로 질량비 (m_b/m_c) μ = 0.152이다. 이를 기본으로 차체 질량과 2차 강성을 변화시켰다. Table 2는 축소형 시험에 사용된 시험조건으로 2차 강성값과 차체질량의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 1 Small scale railway vehicle model

Fig. 2 Position of sensors

Table 1 Specifications of the small scale railway vehicle model

Division	Terms	Unit	Input
Mass	Car body	kg	19.36
	Bogie frame		2.943
	Wheelset		1.0117
Length	Car body	mm	1,540
	Wheel diameter		57
	Distance between bogie center		1060
	Distance between axle		163
	Distance between 1'st spring		148.8
	Distance between 2'st spring		128.8

2.2 축소형 차량 실험방법

가속도계를 Fig. 2와 같이 차체(body), 대차(bogie)와 윤축(wheelset)에 각각 부착하여 좌우방향 진동가속도신호를 검출하였고, 펄스(B&K pulse)을 이용하여 데이터를 분석하여 실험조건별로 데이터를 저장하였다. 철도차량의 동특성을 해석하기 위하여 저역통과필터(low-pass filter) 처리한 후 분석하였고, 차

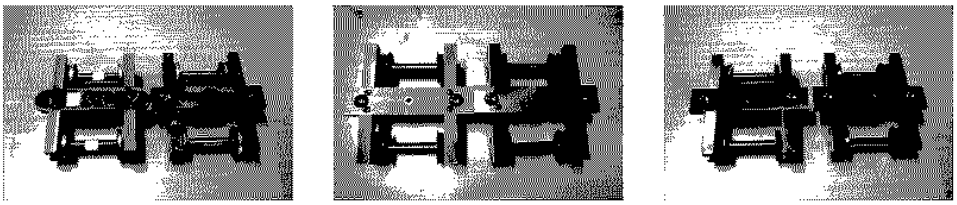
윤답면형상에 따라 주행속도변로 차체질량과 2차 강성변화변로 차체, 대차와 윤축의 횡진동 가속도의 크기를 RMS값으로 표시하였다.

Table 2 Conditions of the small scale railway vehicle model test

No	Wheel tread	2'nd Suspension type(N/mm)	Mass(kg)	Running speed(km/h)
1	flat	No_4(34.06)	0, 4.72, 9.44, 14.16	60, 90, 120, 150
2	cone 1/20	No_5(40.07)		
3	cone 1/40	No_6(80.15)		

2.2.1 차륜답면 형상변화

차륜답면 형상은 Fig. 3과 같이 원통형, 원추형(1/20)과 원추형(1/40)의 세 가지 종류로 시험을 수행하였다.

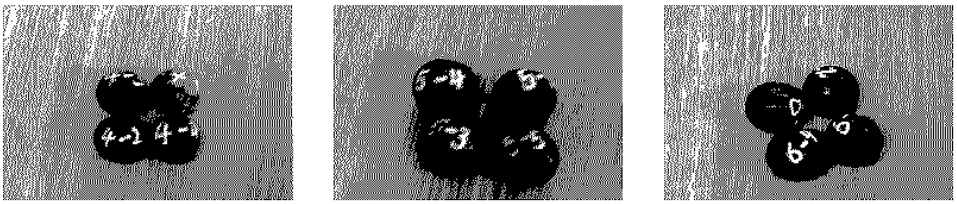


(a) flat (b) cone 1/20 (c) cone 1/40

Fig. 3 Bogie system

2.2.2 2차 강성변화

강성변화 시험은 Fig. 4와 같이 각기 다른 강성값을 가진 3가지의 2차 현가장치인 고무 스프링 각각 교환하면서 차체에 미치는 진동을 측정하였다. 주행속도는 60, 90, 120, 150 km/h로 일정하게 유지하면서 주행속도에 따른 진동특성을 검토하였다. 주행속도 측정은 Fig. 2의 하단에 부착되어 있는 포토센서를 이용하여 차륜의 회전수를 구하였고, 차륜의 회전수는 370, 555, 740, 987 rpm으로 하였다.



(a) No_4(34.06 N/mm) (b) No_5(40.07 N/mm) (c) No_6(80.15 N/mm)

Fig. 4 Rubber balls for the secondary suspension system

2.2.3 차체 질량변화

축소형 차량모델에 대한 차체 질량변화 시험방법은 축소형 차량모델의 1, 2차 현가장치의 강성값을 고정한 상태에서 주행속도별로 차체질량을 4.72, 9.44, 14.16 kg로, 즉 질량비($\mu = m_b/m_c$)의 변화에 따른 차체, 대차와 윤축의 진동특성을 검토하였다.

3. 실험결과 및 분석

Fig.5는 원추형 1/40 차륜을 부착한 축소형 차량모델에 대해 실험한 결과와 ADAMS/RAIL로 차량을 모델링 하여 차체의 횡진동 변위를 비교하여 나타낸 결과이다. ADAMS/RAIL에서 전 대차(front bogie)와 후 대차(rear bogie), 차체(car body)의 세 가지 서브시스템(subsystem)을 모델링하였다. 각각의 서브시스템은 해당모델의 특성을 결정짓는 템플리트로 구성되어 있다. Fig.5에서와 같이 실험과 시뮬레이션 결과가 유사한 경향이 나타나므로 실험에 대한 신뢰성을 검증할 수 있다.

3.1 차륜답면 형상변화

Fig. 6은 차륜답면 형상별로 차체, 대차, 윤축에서의 횡진동 변위의 크기를 나타내고 있다. 고속주행시 대차와 윤축에서 원추형 1/20 차량의 진동크기가 원추형 1/40과 원통형의 진동크기보다 커지는 것을 확인할 수 있었다.

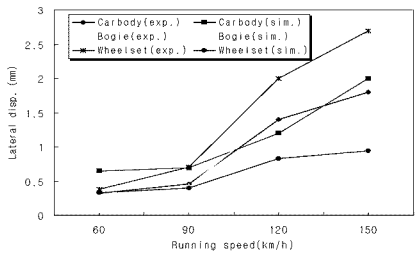


Fig. 5 Lateral motion for the wheelset of 1/40 conicity and ADAMS/RAIL analysis

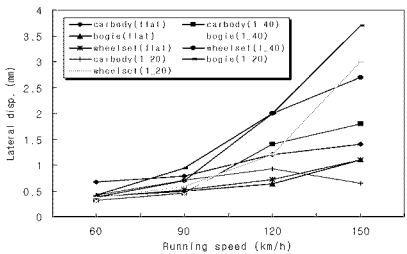
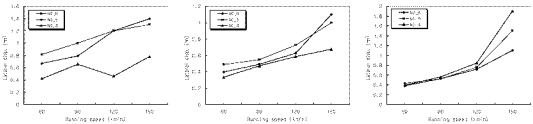


Fig. 6 Lateral motion for the different wheelsets

3.2 2차 강성변화

3.2.1 원통형 차륜답면

Fig. 7은 원통형 차륜답면 경우, 차량 부위별 2차 강성값 변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다. Fig. 7에서와 같이 차체와 대차에서는 2차 강성값이 증가함에 따라 횡진동 변위가 증가함을 확인할 수 있었다.

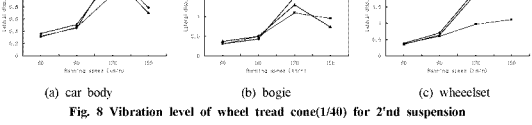


(a) car body (b) bogie (c) wheelset

Fig. 7 Vibration level of wheel tread flat for 2'nd suspension

3.2.2 원추형 차륜답면(1/40)

Fig. 8은 원추형 차륜답면(1/40) 경우, 차량 부위별 2차 강성값의 변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다. Fig. 8에서와 같이 차체, 대차와 윤축에서는 2차 강성값이 증가함에 따라 횡진동 변위가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 주행속도가 증가함에 따라 횡진동 변위도 증가함을 확인할 수 있다.

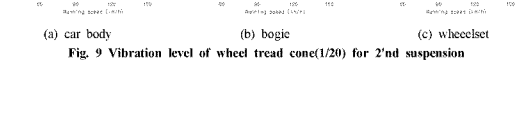


(a) car body (b) bogie (c) wheelset

Fig. 8 Vibration level of wheel tread cone(1/40) for 2'nd suspension

3.2.3 원추형 차륜답면(1/20)

Fig. 9는 원추형 차륜답면(1/20) 경우, 차량 부위별 2차 강성값의 변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 원추형 차륜답면(1/40)과 유사한 경향이 나타났고, 원추형 차륜답면(1/20)이 원추형 차륜답면(1/40)보다 횡진동 변위가 전체적으로 증가함을 확인할 수 있다.

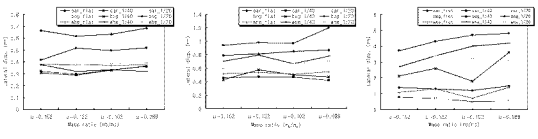


(a) car body (b) bogie (c) wheelset

Fig. 9 Vibration level of wheel tread cone(1/20) for 2'nd suspension

3.3 차체 질량변화

Fig. 10은 대차질량(m_B)에 대한 차체질량(m_C)변화, 즉 질량비($\mu=m_B/m_C$) 변화시 주행속도에 따른 횡진동 변위를 나타내었다. 주행속도가 증가함에 따라 차체에 미치는 진동은 감소하고, 차륜답면구배가 커질수록 진동이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 질량비가 증가함에 따라 진동이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 60 km/h에서는 원통형 차륜답면에서의 차체 진동이 크고, 150 km/h에서는 원추형(1/20) 차륜답면형상 대차가 다른 차륜답면형상 대차보다 진동이 컸다.



(a) v=60 km/h (b) v=90 km/h (c) v=150 km/h

Fig. 10 Vibration level for weighted mass

4. 결론

본 연구는 철도차량의 안정성 해석에 중요한 영향을 미치는 횡진동 해석을 위하여 실차실험의 제약에 따른 설물의 성능이나 신뢰성 여부를 검토하기 위하여 축소형 차량모델을 이용하여 차륜답면형상, 2차 강성값, 차체질량 등의 매개변수 변화에 따른 차체, 대차, 윤축의 진동특성에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였고 ADAMS/RAIL로 해석한 결과와 비교하였다. 축소형 차량모델을 이용한 실험결과, 차륜답면 구배가 커질수록 횡진동 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 2차 강성값이 증가함에 횡진동 변위가 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 대차에 대한 차체질량을 변화시켜 실험한 결과, 질량비(μ)가 증가할수록 진동이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 저속에서는 원통형차륜을 부착한 경우의 진동이 컸고, 고속에서는 1/20 원추형 차륜답면을 부착한 경우가 다른 경우에 비해 진동이 커짐을 확인하였다.

참고문헌

1. 허현무, 권성태, 이찬우, 구동회 (2004), "원호형 차륜답면형상 설계 및 현차시험 결과," 한국철도학회 논문집, 제 7권, 제 2호, pp. 1~7.
2. 김재철 외 (2002), " 고속철도 차량 주행특성 연구보고서," 한국철도기술연구원.
3. 양보석 역 (1998), "진동모형 실험법," 시그마프레스
4. H. Yabuno, T. Okamoto and N. Aoshima (2001), Stabilization Control for the Hunting Motion of a Railway Wheelset," Vehicle System Dynamics Supplement 35, pp. 41~55
5. 최경진 (2002), "여객용 철도차량의 공기스프링과 차체질량이 상하진동에 미치는 영향," 숭실대학교, 박사학위논문.
6. Rao V. Dukkipati (2001), "Lateral stability analysis of a railway truck on roller rig," Mechanism and Machine Theory 36, pp. 189~204.