

축소형 철도차량의 설계변수에 따른 횡진동 해석 Lateral Vibration Analysis for Design Parameter of the Scale Model of a Railway Vehicle

이 승 일* · 최 연 선*

Seung Il Lee and Yeon Sun Choi

(2006년 8월 17일 접수 ; 2006년 11월 24일 심사완료)

Key Words : Railway Vehicle(철도차량), Lateral Vibration(횡진동), Scale Model(축소형), Design Parameter(설계변수)

ABSTRACT

The vibration of a running railway 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 of the scale model of a railway vehicle. Also, the effects on the car-body, bogie and wheelset were examined for the weight and the stiffness of the second suspension system. The experimental results showed that the lateral vibration increases as the wheel conicity and stiffness of the second suspension system 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. 서 론

철도차량의 동적해석은 차량의 안정성, 승차감을 향상시키고, 차륜과 레일의 마모를 감소시키는데 그 목적이 있다. 차량 주행 중에 발생하는 진동은 전후 좌우·상하 진동이 조합되는 형태로 존재하나 차량의 안정성 해석에 중요한 영향을 미치는 요소는 횡진동이다. 차륜과 레일이 접촉하며 주행하는 철도차량의 차륜담면 형상은 횡진동의 크기에 영향을 미친다⁽¹⁾. 횡진동이 증가하면 차륜과 레일사이 미끄럼이 생기고, 접촉점에서 크리프(creep)력이 작용하게 되고 주

행속도가 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 윤축모형 주행 실험장치를 이용하여 윤축의 헌팅운동에 대한 안정성 실험하였고, 최경진^(5,6)은 축소형 차량모델 실험장치를 이용하여 공기스프링과 차체질량이 철도차량의 상하진동에 미치는 영향을 검토하였다. Dukkipati⁽⁷⁾은 화차모델 실험장치를 이용하여 차륜반경, 원호각, 캔트에 따른 차량모델의 헌팅속도를 실험하였고, 이를 철도차량 동특성 해석 시뮬레이션 프로그램으로 검증하였다. 이 연구에서는 실차와 유사한 상태인 축소형 차량모델을 이용하여 차륜담면 형상변화에 따른 주행실험

† 책임저자; 정희원, 한국철도대학 철도차량기계과
E-mail : leeyil@hanmail.net
Tel : (031)460-4348, Fax : (031)462-2944

* 정희원, 성균관대학교 기계공학부

을 수행하였다. 또한 설계변수인 차체 질량과 2차 현가계의 강성 변화에 따른 차체, 대차와 윤축의 횡진동 특성을 검토하였다.

2. 축소형 모형실험

2.1 실험장치

이 연구에서 사용된 축소형 차량모델은 Fig. 1과 같이 차체와 대차로 구성되었다^(5,6). 1, 2차 현가계를 이용하여 축상, 대차 프레임, 차체를 조립하였고, 1차 현가계는 코일스프링, 2차 현가계는 고무스프링을 사용하였다. Table 1은 축소형 차량모델의 주요 제원이다. 축소모형 철도차량 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 철도차량실험에서 가진 실험과 강제진동 응답배율이 1/3~1/5이지만 축소형 차량모델 크기의 제약을 받으므로 실차의 약 1/15, 축소형 차량모델의 질량은 실차의 약 1/750로 하였다. $k_1 = 272.11 \text{ N/m}$, $k_2 = 40.07 \text{ N/m}$ 로 하여 강성비가 $\kappa = 0.147$ 이고, 축소형 차량모델의 차체

질량은 $m_c = 19.36 \text{ kg}$, 대차 프레임 질량은 $m_b = 2.943 \text{ kg}$ 으로 질량비(m_b/m_c) $\mu = 0.152$ 이다. 이를 기본으로 차체 질량과 2차 현가계의 강성을 변화시켰다. Table 2는 축소형 실험에 사용된 실험조건으로 2차 현가계의 강성(스프링 하중 시험기를 이용하여 하중과 변위를 측정)과 차체질량의 변화를 나타내고 있다.

2.2 축소형 차량 실험방법

진동 가속도계를 Fig. 2와 같이 차체(car-body), 대차(bogie)와 윤축(wheelset)에 각각 부착하여 좌우방향 진동가속도신호를 검출하였고, 신호분석기(B&K, pulse)를 이용하여 데이터를 분석하여 실험 조건별로 데이터를 저장하였다. 철도차량의 동특성을 해석하기 위하여 저역통과필터(low-pass filter) 처리한 후 분석하였고, 주행속도에 따른 차륜담면 형상, 차체질량과 2차 현가계의 강성변화별 차체, 대차와 윤축의 횡진동 가속도의 크기를 RMS 값으로 표시하였다.

(1) 차륜담면 형상변화

차륜담면 형상은 Fig. 3과 같이 원통형, 원추형

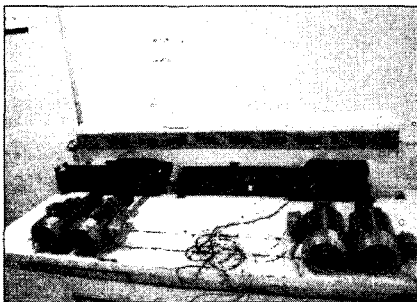


Fig. 1 Small scale railway vehicle model

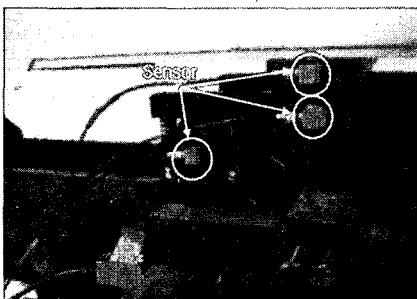


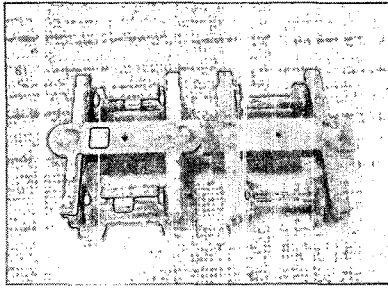
Fig. 2 Position of sensors

Table 1 Specifications of the small scale railway vehicle model

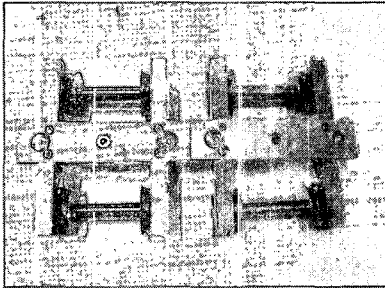
Section	Terms	Unit	Input
Mass	Car-body	kg	19.36
	Bogie frame		2.943
	Wheelset		1.0117
Length	Car body	mm	1,540
	Wheel diameter		57
	Distance between bogie center		1060
	Distance between axle		163
	Distance between 1'st spring		148.8
	Distance between 2'st spring	128.8	

Table 2 Conditions of the small scale railway vehicle model test

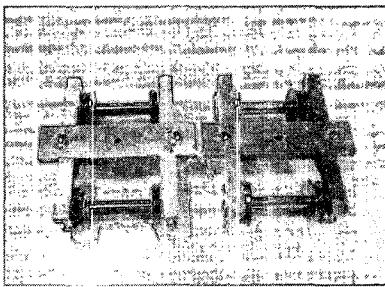
Wheel tread type	2'nd Suspension type (N/mm)	Mass (kg)	Running speed (km/h)
Flat	No_4 (34.06)	0	60
Cone 1/20	No_5 (40.07)	4.72	90
Cone 1/40	No_6 (80.15)	9.44	120
		14.16	150



(a) Flat

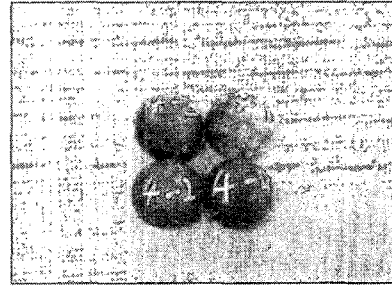


(b) Cone 1/20



(c) Cone 1/40

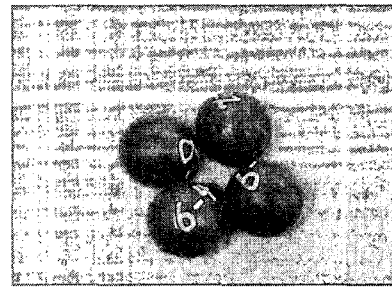
Fig. 3 Bogie system



(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

(1/20)과 원추형(1/40)의 세 가지 종류로 주행실험을 수행하였다.

(2) 2차 현가계의 강성변화

2차 현가계의 강성변화 실험은 Fig. 4와 같이 각각 다른 강성을 가진 3가지의 2차 현가계인 고무 스프링을 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.

(3) 차체 질량변화

축소형 차량모델에 대한 차체 질량변화 실험방법은 축소형 차량모델의 1, 2차 현가계의 강성을 고정된 상태에서 주행속도별로 차체질량을 0, 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

철도차량 전용 동역학 해석프로그램인 ADAMS/Rail을 이용하여 축소형 차량모델 주행실험의 타당성을 검증하였다. Fig. 5는 축소형 차량모델에 대한 ADAMS/RAIL의 해석모델로 전 대차(front bogie)와 후 대차(rear bogie), 차체(car-body)의 세 가지

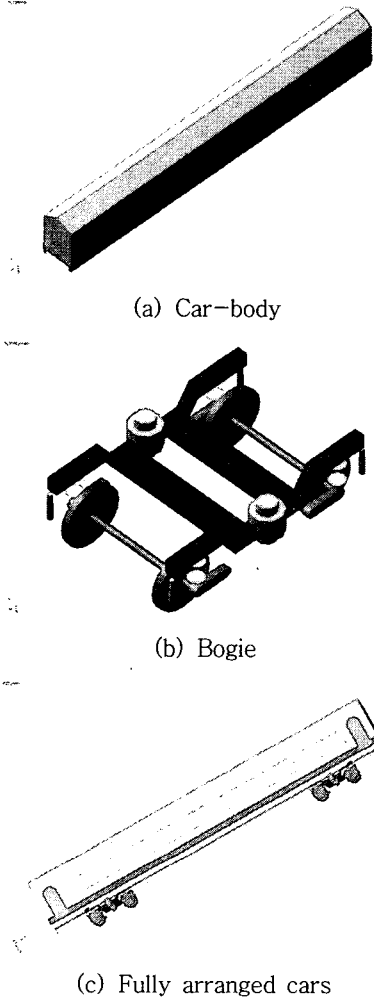


Fig. 5 Modeling with ADAMS/RAIL

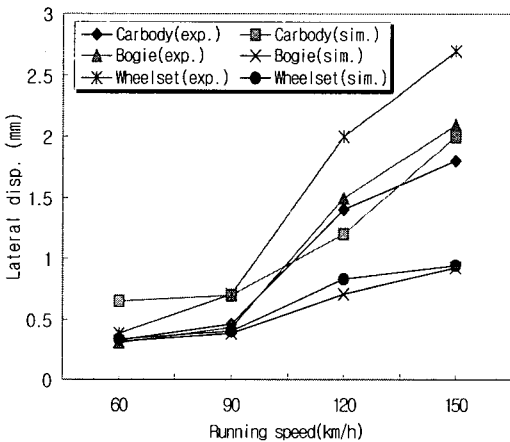


Fig. 6 Lateral motion for the wheelset of 1/40 conicity and ADAMS/RAIL analysis

서브시스템(subsystem)을 모델링하였다. Fig. 6은 원추형 1/40 차륜 축소형 차량모델에 대한 주행실험과 ADAMS/Rail을 이용한 차량모델의 차체 횡진동 변위를 비교한 결과이다. Fig. 6에서와 같이 주행실험과 수치해석 결과가 정성적으로 유사한 경향이 나타나 실험에 대한 타당성을 검증할 수 있다.

Fig. 7~Fig. 11은 차륜담면 형상, 2차 현가계의 강성과 차체 질량 변화에 따른 축소형 차량모델의 주행실험 결과를 나타내고 있다.

3.1 차륜담면 형상변화

Fig. 7은 차륜담면 형상변화에 따른 차체, 대차, 윤축에서의 횡진동 변위를 나타내고 있다. 고속주행 시 대차와 윤축에서 원추형 1/20 차량의 횡진동 변위가 원추형 1/40과 원통형의 횡진동 변위보다 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 차륜담면 구배가 커짐에 따라 사행동이 증가하여 횡진동이 증가하는 것으로 판단된다.

3.2 2차 현가계의 강성변화

(1) 원통형 차륜담면

Fig. 8은 원통형 차륜담면 형상을 부착하고 주행하는 경우, 차량 부위별 2차 현가계의 강성변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다.

Fig. 8에서와 같이 차체와 대차에서는 2차 현가계의 강성이 증가함에 따라 횡진동의 변위가 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 2차 현가계의 강성이 증가함에 따라 진동이 감소하지 않고 대차와 차체로 그대로 전달되기 때문으로 사료된다.

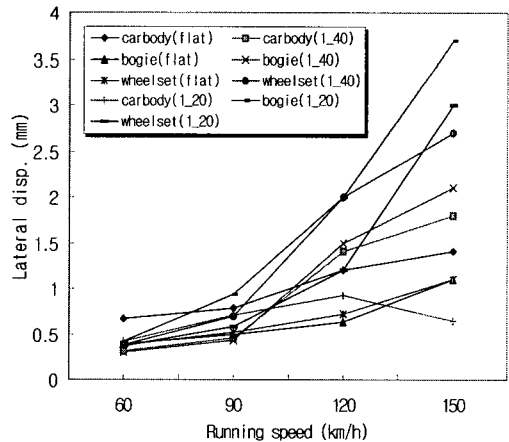


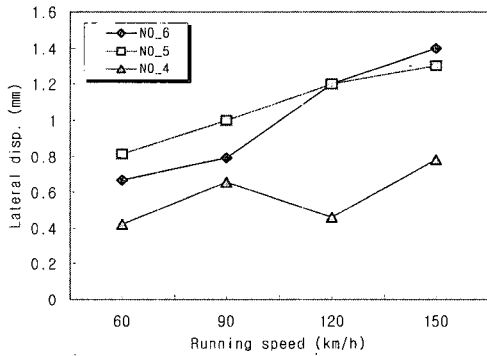
Fig. 7 Lateral motion for the different wheelsets

(2) 원추형 차륜답면(1/40)

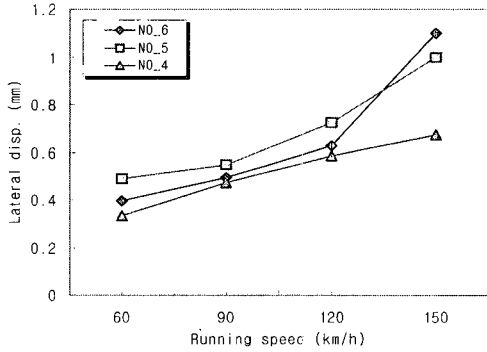
Fig. 9는 원추형 차륜답면 형상(1/40)을 부착하고 주행하는 경우, 차량 부위별 2차 현가계의 강성변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 차체, 대차와 윤축에서는 2차 현가계의 강성이 증가함에 따라 횡진동 변위가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 주행속도가 증가함에 따라 횡진동도 증가함을 확인할 수 있다.

(3) 원추형 차륜답면(1/20)

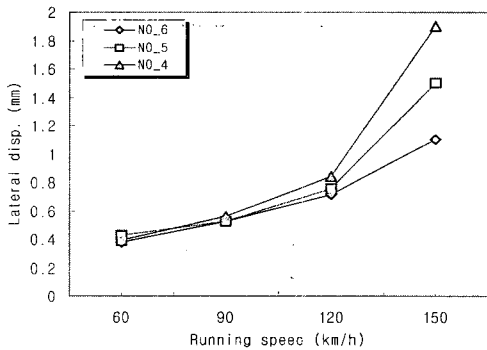
Fig. 10은 원추형 차륜답면 형상(1/20)을 부착하고 주행하는 경우, 차량 부위별 2차 현가계의 강성의 변화에 따른 주행속도별 횡진동 변위를 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 원추형 차륜답면(1/40)과 유사한 경향이 나타났고, 원추형 차륜답면(1/20)이 원추형 차륜답면(1/40)보다 횡진동 변위가 전체적으로 증가함을 확인할 수 있다.



(a) Car-body

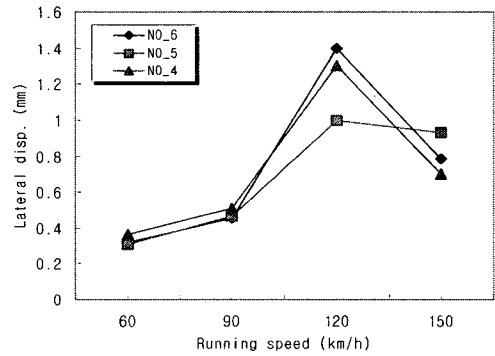


(b) Bogie

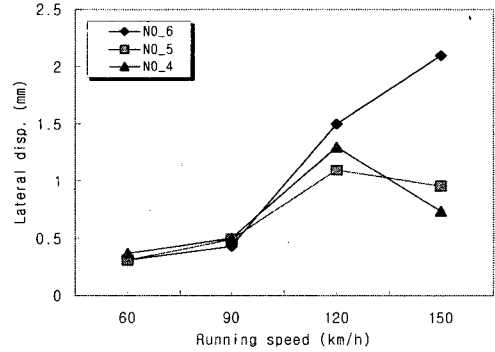


(c) Wheelset

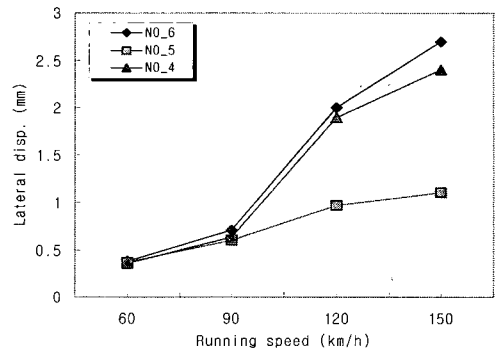
Fig. 8 Vibration level of wheel tread flat for 2'nd suspension



(a) Car-body



(b) Bogie



(c) Wheelset

Fig. 9 Vibration level of wheel tread cone(1/40) for 2'nd suspension

3.3 차체 질량변화

Fig. 11은 대차질량(m_b)에 대한 차체질량(m_c) 변화, 즉 질량비($\mu = m_b/m_c$) 변화 시 주행속도에 따른 횡진동 변위를 나타내고 있다. Fig. 11에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 차체에 미치는 횡진동 변위는 감소하고, 차륜담면 구배가 커질수록 횡진동 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 질량비가 증가함에 따라 횡진동 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 60 km/h에서는 원통형 차륜

담면에서의 차체의 횡진동 변위가 크고, 150 km/h에서는 원추형(1/20) 차륜담면 형상 대차가 다른 차륜담면 형상 대차보다 횡진동이 컸다.

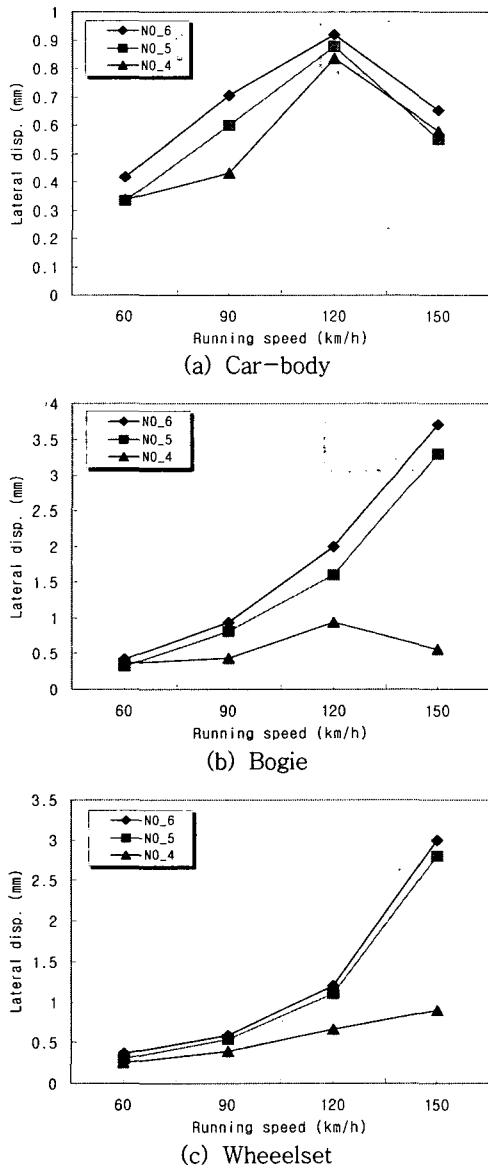


Fig. 10 Vibration level of wheel tread cone(1/20) for 2'nd suspension

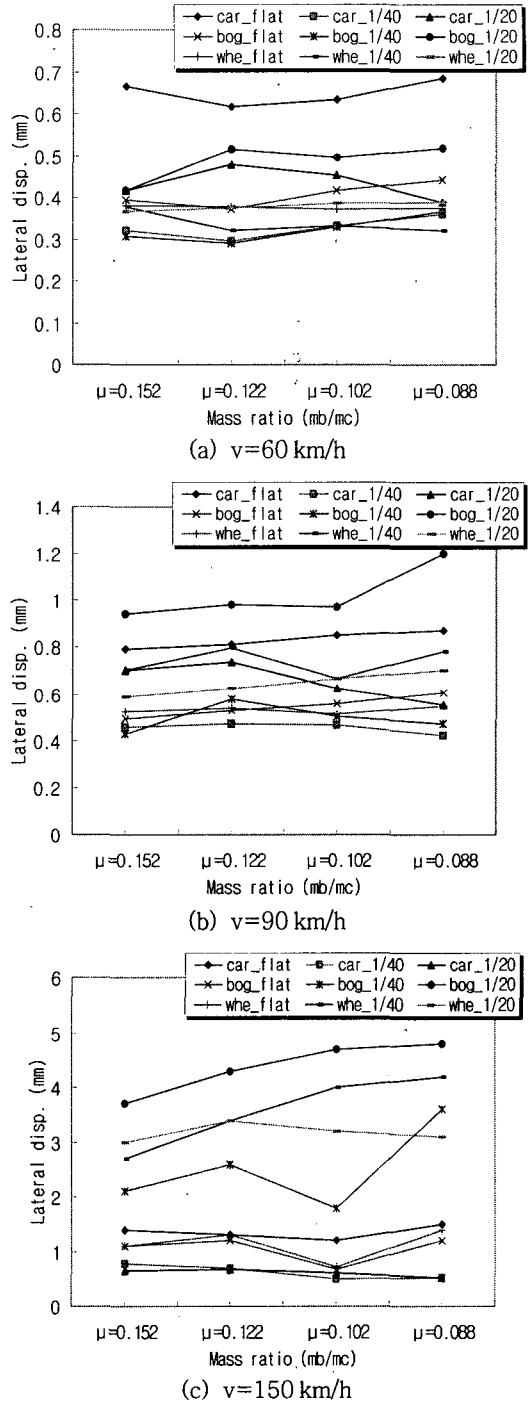


Fig. 11 Vibration level for weighted mass

4. 결 론

이 연구는 철도차량의 안정성 해석에 중요한 영향을 미치는 횡진동 해석을 위하여 실차실험의 제약에 따른 실물의 성능이나 신뢰성 여부를 검토하기 위하여 축소형 차량모델을 이용하여 차륜담면 형상, 2차 현가계의 강성, 차체 질량 등의 매개변수 변화에 따른 차체, 대차, 윤축의 진동특성에 미치는 영향에 대하여 축소형 차량모델실험을 수행하였고, 타당성을 검증하기 위하여 ADAMS/RAIL로 해석한 결과와 비교하였다.

축소형 차량모델을 이용한 실험결과, 차륜담면 구배가 커질수록 횡진동이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 2차 현가계의 강성이 증가함에 횡진동이 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 대차에 대한 차체 질량을 변화시켜 실험한 결과, 질량비(μ)가 증가할수록 진동이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 저속에서는 원통형차륜을 부착한 경우의 진동이 컸고, 고속에서는 1/20 원추형 차륜담면을 부착한 경우가 다른 경우에 비해 진동이 커짐을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Hur, H. M., Kwon, S. T., Lee, C. W. and

Goo, D. H., 2004, "Arc-type Wheel Profile Design and Test Results", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 2, pp. 1~7.

(2) Kim, J. C., et al., 2002, "A Study on Running Performance for KTX", Krri.

(3) Yang, B. S., 1998, "The Test Method of Vibration Scale Model", Sigma Press.

(4) Yabuno, H., Okamoto, T. and Aoshima, N., 2001, "Stabilization Control for the Hunting Motion of a Railway Wheelset", Vehicle System Dynamics Supplement 35, pp. 41~55.

(5) Choi, K. J., 2002, "Effect of Air Spring and Car Body Mass on Vertical Vibration of Railway Passenger Vehicle," Soongsil University, PhD.

(6) Choi, K. J., Lee, D. H., Jang, D. U. and Kwon, Y. P., 2003, "Analysis and Small Scale Model Experiment on the Vertical Vibration of the KT-23 Type Passenger Vehicle", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 266~273.

(7) Rao V. Dukkipati, 2001, "Lateral Stability Analysis of a Railway Truck on Roller Rig", Mechanism and Machine Theory 36, pp. 189~204.