

다축 로드 시뮬레이터를 이용한 대형트럭 주요 시스템의 바운스와 롤 및 피치 주파수의 실험적 분석

문일등*, 오재윤#

Experimental Analysis of Bounce, Roll and Pitch Frequencies of Major Systems of a Large Truck using a Multi-axial Road Simulator

Il Dong Moon*, Chae Youn Oh#

ABSTRACT

This paper presents a scheme for experimentally analyzing bounce, roll and pitch frequencies of major systems of a large truck using a multi-axial road simulator. The excitation input (amplitude and frequency range) for a frequency response test with the multi-axial road simulator is selected in order that bounce, roll and pitch modes are not coupled each other, the excitation amplitude can be reproduced in a specified excitation frequency range, and tires do not lose contact with posters. Three accelerometers, one gyroscope and four displacement meters are used in the frequency response test using the multi-axial road simulator. The reliability of the presented bounce mode frequency response test scheme is validated by comparing the result from a test using the multi-axial road simulator with the result from a road driving test. The road driving test is performed with velocities of 20km/h and 30km/h, and in an unladen state. The vertical accelerations at the cab and the front axle are measured in the road driving test. The roll and pitch mode frequency response tests are also performed with the presented frequency response test scheme. Roll and pitch frequencies of major systems of a large truck that are hard to acquire from a road driving test are analyzed as well as bounce frequency.

Key Words : Multi-axial road simulator(다축 로드 시뮬레이터), bounce, roll and pitch mode analysis(바운스, 롤, 피치 모드 분석), frequency response test(주파수 응답 시험), large truck(대형트럭), experimental analysis(실험적 분석)

1. 서론

대형트럭은 지상고가 높고 중량이 큼으로 해서 차량의 진동은 운전자가 느끼는 승차감에 많은

영향을 미칠 뿐 아니라 조종성에 까지도 영향을 미칠 수 있다. 여기서 진동은 승차감과 직접적인 관계가 있는 바운스(bounce) 및 피치 운동(pitch motion)과 조종성과 관련이 되는 롤 운동(roll motion)을 의미한다. 따라서 대형트럭 진동특성에

접수일: 2004년 11월 18일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

* 타타대우상용차㈜

교신저자, 전북대학교 기계항공시스템공학부 자동차신기술연구소

E-mail ohcy@moak.chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2377

많은 영향을 미치는 캡, 차축, 프레임 등과 같은 대형트럭 주요시스템의 바운스와 롤 및 피치 주파수를 분석할 수 있다면 승차감 향상과 더불어 조종성 향상에도 크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서 최근에 이들에 대한 연구가 이루어지고 있다.¹

지금까지 대형트럭의 주파수를 평가하는 데는 주로 도로 주행시험(road driving test)이 사용되어져 왔다. 도로 주행시험을 통하여 차량의 주파수를 평가하는 방법은 차량이 바운스, 롤, 피치 모드가 연성 되어 나타나기 때문에 각 모드를 구분하는데 상당한 어려움을 수반한다. 그리고 다양한 조건에서 롤 운동과 피치 운동에 대한 시험을 수행하는데 어려움이 있다.

지금까지 대형트럭 분야에서는 다축 로드 시뮬레이터(multi-axial road simulator)를 전체 차량 및 주요 시스템의 내구성능을 평가하기 위한 내구시험(durability test)용으로만 사용하였다.^{2,3} 그러나 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 대형트럭 바운스 모드 및 롤 모드와 피치 모드 주파수를 분석하기 위한 시험에 활용할 수 있다면 실차 시험으로는 기대하기 어려운 다양한 조건에서 시험을 실내에서 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 대형트럭 주요 시스템의 바운스, 롤 및 피치 모드 주파수를 실험적으로 분석하기 위한 방안을 제시한다. 다축 로드 시뮬레이터로부터 구한 바운스 모드 주파수 응답과 도로 실차 주행시험을 통해 구한 바운스 모드 주파수 응답의 비교를 통해 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 바운스 모드 주파수 응답 시험의 신뢰성을 검증한다. 이와 같이 신뢰성이 검증된 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험 방법을 이용하여 피치 모드 주파수 응답 시험과 롤 모드 주파수 응답 시험을 수행하여 대형트럭 주요 시스템의 주파수를 분석한다.

2. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 대형트럭 주요 시스템의 주파수 응답 시험

본 논문에서는 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 캡(cab), 차축(axle), 프레임(frame)과 같은 대형트럭 주요 시스템의 주파수 응답 특성을 실험적으로 분석하였다. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험은 바운스 모드, 롤 모드 혹은 피치 모드가 가능한 한 연성이 되지 않도록 다축

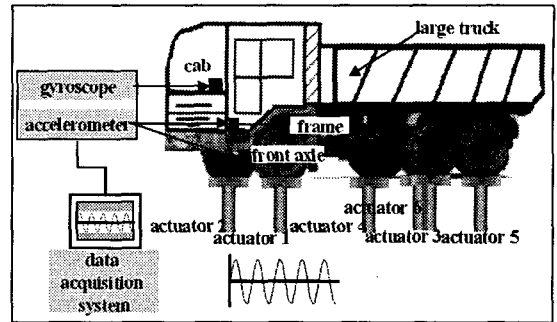


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus for a frequency response test using a multi-axial road simulator

로드 시뮬레이터의 가진 입력 조건을 조절하였다. 이러한 방법을 이용하면 대형트럭 주요 시스템의 바운스, 롤, 피치 모드를 개별적으로 구할 수 있으므로 해서 주요 시스템의 진동 모드 특성을 분석하는데 매우 유용할 것이다.

주파수 응답 시험에 이용한 다축 로드 시뮬레이터는 유압장치(hydraulic unit), 제어장치(control unit), 데이터 처리장치 및 액츄에이터(actuator) 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 대형트럭 주요 시스템의 주파수를 분석하기 위한 시험 장치의 개략도이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 대형트럭 타이어는 6개의 포스터(poster) 위에 놓이며, 포스터는 유압 액츄에이터와 연결되어 있다. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험에서는 3개의 가속도계(accelerometer)와 1개의 자이로 스코프(gyroscope) 및 4개의 변위계(displacement meter)를 사용하였다. 가속도계는 바운스 모드를 자이로스코프와 변위계는 캡의 피치와 롤 모드를 측정하기 위하여 각각 사용하였다. 가속도계는 캡과 프레임 및 전방 차축에 각각 1개씩 부착하였다. 자이로스코프는 캡 질량 중심점에 부착하였다. 그리고 변위계는 프레임의 전,후와 테크의 좌,우에 각각 1개씩 부착하였다.

Table 1은 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 시험에서 사용한 센서와 데이터 획득 장치를 정리하여 보여준다.

바운스, 롤, 피치 모드 주파수 응답 시험의 진폭은 다축 로드 시뮬레이터가 주어진 주파수 범위에서 주어진 진폭을 재현할 수 있는지를 다축 로

Table 1 Equipment used for the frequency response test with the multi-axial road simulator

instrument	model	maker
accelerometer	7265A,AS-5GB	Endevco,Kyowa
gyroscope	VG 81M	Tokyo Aircraft
displacement meter	P-15B-HT	Patriot
amplifier	497.01	MTS
data acquisition system	MTS 458	MTS
data analysis system	RPC II	MTS

드 시뮬레이터 성능곡선을 참조하여 결정했다. 그리고 타이어가 포스터에서 떨어지지 않는 주파수 대역까지 시험을 수행하였다.

다축 로드 시뮬레이터를 이용한 바운스, 롤, 피치 모드 주파수 응답 시험에서는 식 (1)과 같은 형태의 정현파 연속 가진 함수를 사용하였다.

$$R(t) = A \sin(2\pi f)t \quad (1)$$

식 (1)의 정현파 가진 함수의 주파수를 연속적으로 변화시키기 위해 주파수를 $f(t) = \alpha t$ 와 같은 시간의 선형함수로 나타내었다. 여기서 α 는 시험을 안정적으로 수행할 수 있도록 주어진 주파수 대역을 통과하는데 걸리는 시간을 조절하는 인자이다. 본 논문에서는 0.25로 세팅하였다. 식 (1)에 $f(t) = \alpha t$ 의 관계를 대입하면 다음 식과 같이 된다.

$$R(t) = A \sin(\alpha 2\pi t^2) \quad (2)$$

바운스 모드 주파수 응답 시험은 Fig. 1에서 보여주는 6개의 포스터가 $\pm 3\text{mm}$ 의 일정한 진폭으로 상,하 방향으로 동시에 작동하도록 하였다. 그리고 정현파 가진 함수의 주파수를 0Hz에서 25Hz까지 연속적으로 증가시키면서 시험을 수행하였다. 바운스 모드 주파수 응답 시험에서는 캡, 프레임 및 전방 차축의 수직가속도를 측정하여 이들의 바운스 모드 주파수를 분석하였다.

롤 모드 주파수 응답 시험에서는 좌,우 각 3개의 포스터(Fig. 1에서 actuator 1, 3, 5와 actuator 2, 4, 6)를 서로 $\pm 5\text{mm}$ 의 일정한 진폭으로 좌,우 역위상(out of phase)으로 구동 시켰다. 그리고 정현파 가진 함수의 주파수를 0Hz에서 10Hz까지 연속적으로 증가시키면서 시험을 수행하였다. 롤 모드 주파수 응답 시험에서는 캡 질량중심점에서의 롤 각 및 데크 좌,우측의 수직 변위를 측정하여 이들의 롤 모드 주파수를 분석하였다.

피치 모드 주파수 응답 시험은 전방향 포스터(Fig. 1에서 actuator 1, 2)와 후방향 포스터(Fig. 1에서 actuator 3, 4, 5, 6)를 $\pm 5\text{mm}$ 의 서로 동일한 진폭으로 전,후 역위상으로 구동시켰다. 그리고 정현파 가진 함수의 주파수를 0Hz에서 10Hz까지 연속적으로 증가시키면서 시험을 수행하였다. 피치 모드 주파수 응답 시험에서는 캡 질량중심점에서의 피치 각 및 프레임 전,후측의 수직변위를 측정하여 이들의 피치 모드 주파수를 분석하였다.

3. 다축 로드 시뮬레이터의 검증

본 논문에서는 대형트럭 주파수 응답 특성을 평가하기 위하여 다축 로드 시뮬레이터를 이용하는 방법을 제안하였으며, 이 방법의 신뢰성 검증을 위해 노면 위를 주행하는 실차 주행시험 결과와 비교하였다. 실차 주행시험은 공차 상태로 수행하였으며, 20km/h, 30km/h속도로 노면 위를 주행하였다. 실차 주행시험에서는 가속도계를 캡과 전방 차축에 부착하여 각각의 위치에서 수직가속도를 측정하였다. 실차 도로 주행 시험에서는 롤 모드 혹은 피치 모드가 다른 모드와 연성이 발생하지 않도록 시험을 수행하는 것은 매우 어렵다. 그러나 바운스 모드는 실차 도로 주행 시험에서 다른 모드와 연성이 되지 않게 시험을 수행하는 것이 가능하다. 그래서 본 논문에서는 다축 로드 시뮬레이터와 실차 도로 주행시험으로부터 획득한 바운스 모드 주파수 응답 시험 결과만을 비교하여 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 대형트럭 주요 시스템의 주파수 응답 시험 방법에 대한 검증을 수행하였다.

실차 도로 주행시험은 바운스 모드 운동 조건이 되도록 굴곡이 없이 편평한 직선도로에서 일정한 주행속도로 수행하였다. 주행속도는 20km/h와 30km/h 이었으며, 공차상태에서 수행하였다. 실차

도로 주행시험에서는 가속도계를 캡 운전석 바닥면과 전방 차축 중심 위치에 각각 1 개씩 부착하여 각각의 위치에서 수직가속도를 측정하였다. 도로 주행시험을 수행하여 측정한 캡과 전방 차축의 수직 가속도 값은 MSC.ADAMS⁴ 를 이용하여 주파수 분석(frequency analysis)을 수행하여 캡과 전방 차축의 바운스 주파수를 분석하였다.

Fig. 2는 공차상태에서 주행속도 20km/h와 30 km/h로 도로 주행을 수행하여 측정한 캡의 수직가속도와 다축 로드 시뮬레이터의 바운스 모드 주파수 응답 시험을 수행하여 측정한 캡의 수직가속도를 주파수 영역에서 비교하여 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 20km/h와 30km/h의 속도로 도로 주행시험을 수행하여 구한 Fig. 2 (a)와 Fig. 2 (b)는 2.0Hz 부근에서 피크 주파수가 발생하였다. Fig. 2 (c)에서 보는 바와 같이 다축 로드 시뮬레이터의 바운스 모드 주파수 응답 시험에서도 도로

주행시험 결과와 유사한 2.0Hz부근에서 피크 주파수가 발생하였다. 그리고 주파수 특성은 서로 유사한 경향을 보여주었다.

Fig. 3은 공차상태에서 20km/h와 30km/h의 속도로 도로를 주행하여 측정한 전방 차축의 수직가속도와 다축 로드 시뮬레이터의 바운스 모드 주파수 응답 시험을 수행하여 측정한 전방 차축의 수직가속도를 주파수영역에서 비교하여 보여주고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 20km/h와 30km/h의 속도로 도로 주행시험을 수행하여 구한 Fig. 3 (a)와 Fig. 3 (b)는 10~12Hz사이에서 피크 주파수가 발생하였다. Fig. 3 (c)에서 보는 바와 같이 다축 로드 시뮬레이터의 바운스 모드 주파수 응답 시험을 수행하여 구한 결과는 도로 주행시험으로부터 구한 10~ 12Hz사이에서 나타나는 세 개의 피크 주파수를 잘 예측하였다. 13~15Hz대역에서 약간 차이를 보였지만 전반적으로 유사한 경향을 보여주었다.

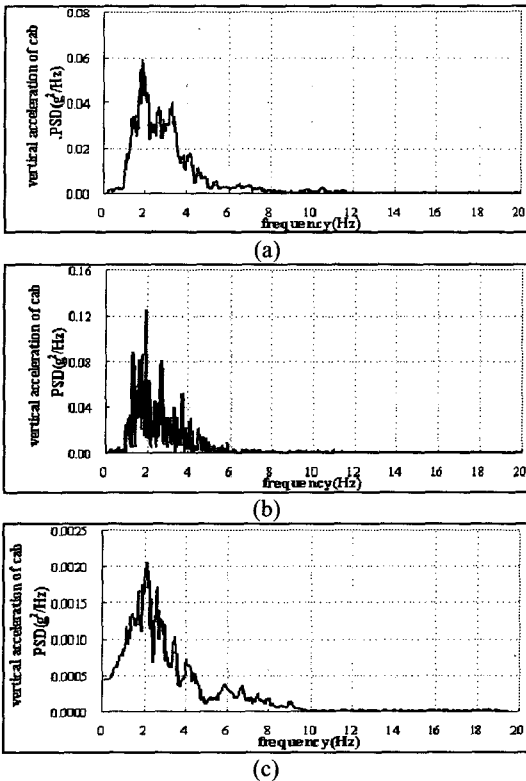


Fig. 2 Vertical acceleration at the cab (a)road driving test with 20km/h (b)road driving test with 30km/h (c)multi-axial road simulator test

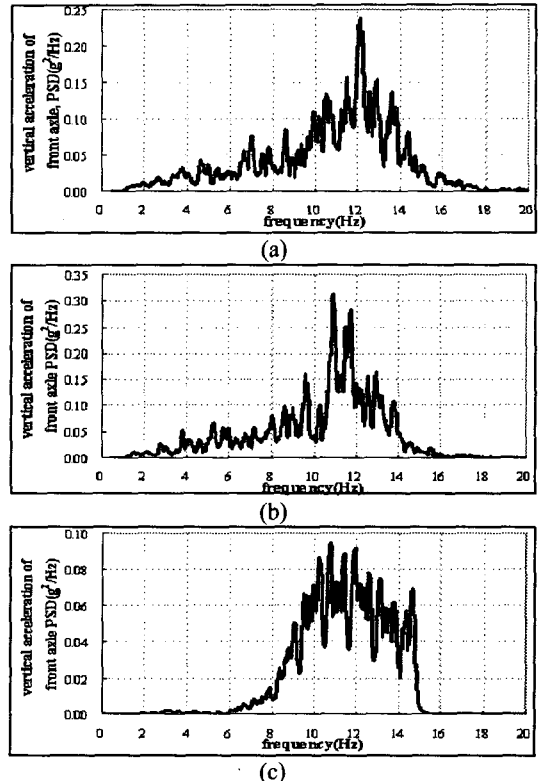


Fig. 3 Vertical acceleration at the front axle (a)road driving test with 20km/h (b)road driving test with 30km/h (c)multi-axial road simulator test

이와 같이 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 바운스 모드 주파수 응답 시험은 실차 도로 주행시험을 수행하여 구한 캡 및 전방 차축의 수직가속도의 피크주파수 대역 뿐만 아니라 경향까지도 매우 근사하게 예측되었다.

4. 로드 시뮬레이터를 이용한 대형트럭 주요 시스템의 주파수 분석

실차 도로 주행시험 결과와 비교를 통해 검증된 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험 방법을 이용하여 롤과 피치 모드에 대한 시험을 수행하였다. 따라서 로드 시뮬레이터를 이용하여 바운스 모드 시험과 더불어 롤 모드 및 피치 모드에 대한 시험을 수행하여 대형트럭 캡, 프레임 및 전방 차축의 바운스, 롤 및 피치 모드 주파수를 분석하였다.

바운스 모드 주파수 응답 시험에서는 캡과 프레임 및 전방 차축의 수직가속도를 측정하여 주파수를 분석하였다. Fig. 4 ~ Fig. 6은 캡, 프레임, 전방 차축의 수직가속도를 시간 영역(time domain)과 주파수 영역(frequency domain)에서 보여주고 있다. Fig. 4는 캡의 수직가속도를 시간 영역과 주파수 영역에서 보여준다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 2.1Hz부근에서 피크 주파수가 발생하였으며 이는

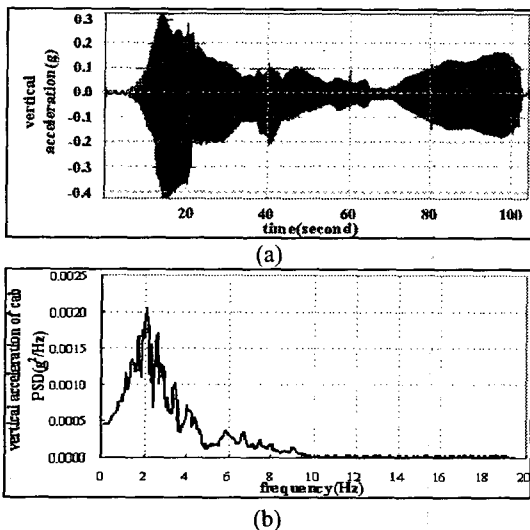


Fig. 4 Vertical acceleration at the cab in bounce mode frequency response test (a)time domain (b)frequency domain

대형트럭 캡의 바운스 모드에 의하여 발생하는 캡 바운스 주파수이다. Fig. 5는 프레임의 수직가속도를 시간 영역과 주파수 영역에서 보여준다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 4.9Hz부근에서 피크 주파수가 발생하였으며 이는 대형트럭 프레임의 바운스 모드에 의하여 발생하는 프레임 바운스 주파수이

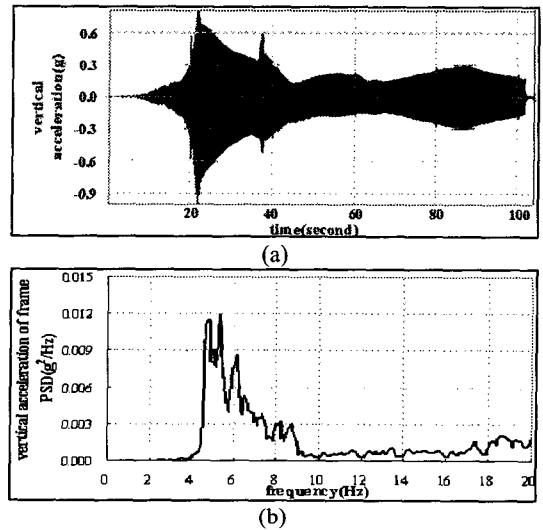


Fig. 5 Vertical acceleration at the frame in bounce mode frequency response test (a)time domain (b)frequency domain

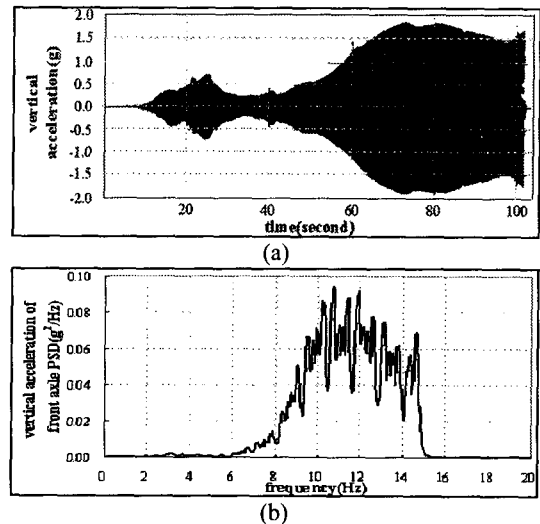


Fig. 6 Vertical acceleration at the front axle in bounce mode frequency response test (a)time domain (b)frequency domain

다. Fig. 6은 전방 차축의 수직가속도를 시간 영역과 주파수 영역에서 보여준다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 10~12Hz사이에서 피크 주파수가 발생하였으며 이는 대형트럭 전방 차축의 바운스 모드에 의하여 발생하는 전방 차축 바운스 주파수이다.

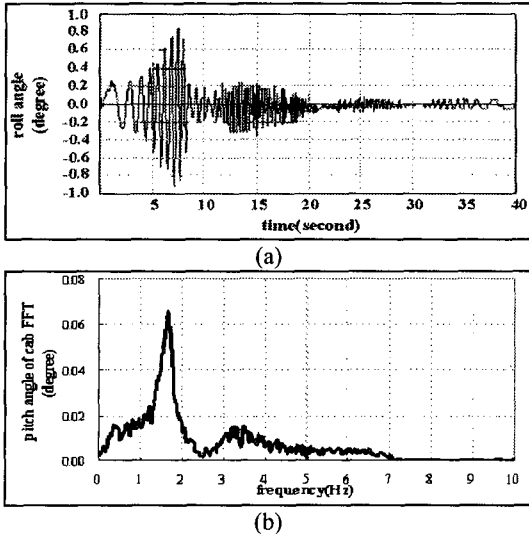


Fig. 7 Roll angle at the cab in roll mode frequency response test. (a) time domain (b) frequency domain

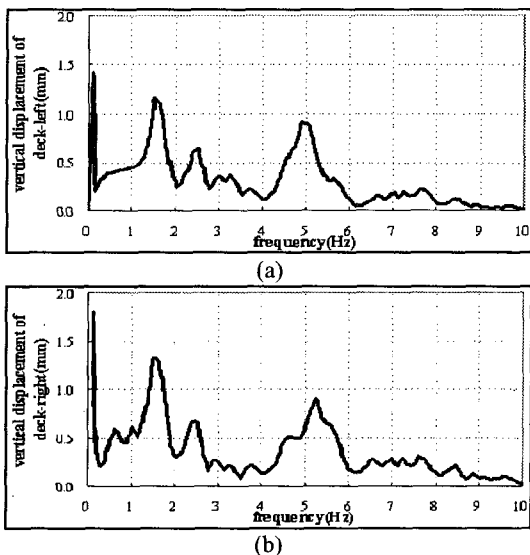


Fig. 8 Vertical displacement at the deck in roll mode frequency response test (a) left side (b) right side

다축 로드 시뮬레이터를 이용한 롤 모드 시험에서는 캡의 롤 각 및 데크의 수직 변위를 측정하여 주파수 분석을 하였다. Fig. 7은 자이로스코프를 이용하여 캡에서 측정된 롤 각을 시간 영역과 주파수 영역에서 보여주고 있다. Fig. 7 (b)를 보면

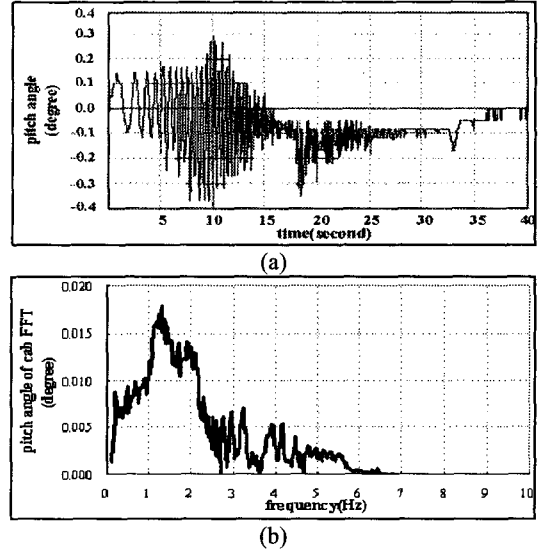


Fig. 9 Pitch angle at the cab in pitch mode frequency response test. (a) time domain (b) frequency domain

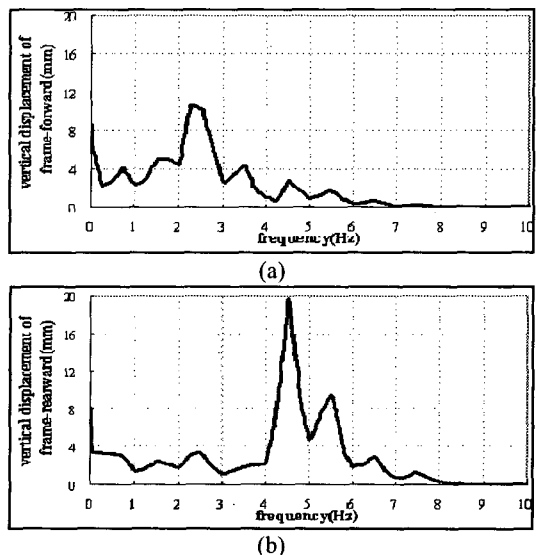


Fig. 10 Vertical displacement at the frame in pitch mode frequency response test (a)forward (b)rearward

1.65Hz 근방에서 피크 주파수를 보이고 있는데 이것은 대형트럭 캡의 롤 주파수이다. Fig. 8은 변위계를 이용하여 좌,우 데크의 수직 변위량을 측정 한 결과를 시간 영역과 주파수 영역에서 보여주고 있다. 이 결과를 보면 1.53Hz와 4.9Hz에서 피크치를 보이는데 이것은 데크의 롤 주파수이다

다축 로드 시뮬레이터를 이용한 피치 모드 시험에서는 캡의 피치 각 및 프레임 전,후의 수직 변위를 측정하여 주파수를 분석 하였다. Fig. 9는 자이로스코프를 이용하여 캡에서 측정한 피치 각을 시간영역과 주파수영역에서 보여주고 있다. 이 결과를 보면 1.3Hz 근방에서 피크주파수를 보이고 있는데 이것은 대형트럭 캡의 피치 주파수이다. Fig. 10은 변위계를 이용하여 전,후방 프레임에서 측정한 수직 변위를 시간영역과 주파수영역에서 보여주고 있다. 이 결과를 보면 2.27Hz와 4.53Hz 두 개의 피크치를 보였다. 2.27Hz는 후방 차축을 중심으로 운동하는 프레임의 피치 주파수이며, 4.53Hz는 전방 차축을 중심으로 운동하는 프레임의 피치 주파수이다.

Table 2는 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 바운스와 롤 및 피치 모드 주파수 응답 시험을 수행하여 구한 대형트럭 캡, 차축 및 프레임의 주파수를 정리하였다.

Table 2 Bounce, roll and pitch frequencies of major systems

system	frequency (Hz)	mode shape
cab	1.30	pitch mode
	1.65	roll mode
	2.10	bounce mode
frame	2.27	pitch mode with respect to the rear axle
	4.53	pitch mode with respect to the front axle
	4.85	bounce mode
front axle	10.86	bounce mode
deck	1.50	roll mode
	4.90	

5. 결론

본 논문에서는 다축 로드 시뮬레이터를 이용하여 대형트럭 캡과 프레임 및 전방 차축의 바운스, 롤 및 피치 모드 주파수를 실험적으로 분석하기 위한 방안을 제시하였다. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험에서는 바운스 모드, 롤 모드 혹은 피치 모드가 가능한 한 연성이 되지 않고, 주어진 주파수 범위에서 주어진 진폭을 재현할 수 있고, 타이어가 포스터에서 떨어지지 않도록 가진 입력 조건을 조절하였다. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험에서는 3개의 가속도계와 1개의 자이로스코프 및 4개의 변위계를 사용하였다. 다축 로드 시뮬레이터 바운스 모드 주파수 응답 시험의 신뢰성을 검증하기 위하여 실차 도로 주행시험을 수행하였다. 주행시험은 20km/h, 30km/h의 속도로 공차 상태에서 수행하였으며 캡과 전방 차축에서의 수직가속도를 측정하였다. 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 바운스 모드 주파수 응답 시험은 실차 도로 주행시험을 수행하여 구한 캡 및 전방 차축의 수직가속도의 피크주파수 대역 뿐만 아니라 경향까지도 매우 근사하게 예측하였다. 이와 같이 실차 도로 주행시험 결과와 비교를 통해 신뢰성을 검증한 다축 로드 시뮬레이터를 이용한 주파수 응답 시험 방법을 이용하여 롤과 피치 모드에 대한 주파수 응답 시험을 수행하여 대형트럭 캡, 프레임 및 전방 차축의 바운스 모드 뿐 아니라 실차 도로 주행시험으로부터는 얻기 어려운 롤 및 피치 모드의 주파수를 분석하였다.

참고문헌

1. Sternberg, E. R., Gillespie, T. D., "Truck Systems - Design Handbook," Published by Society of Automotive Engineers, inc., 1992.
2. Madden, M. B., "Road Simulator testing of Large Vehicles," SAE 700455, 1970.
3. Cryer, B. W., Nawrocki, P. E., Lund, R. A., "A Road Simulation System for Heavy Duty Vehicles," SAE 760361, 1976.
4. MSC.ADAMS, "ADAMS User's Manual," MacNeal-Schwendler Corporation, U.S.A., 2001.
5. Son, S. H., Heo, S. J., "Virtual Durability Test

- Procedures and Applications on Design of a Vehicle Suspension Module,” Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 4, pp.144-150, 2003.
6. Jeong, S. H., Kim, W. Y., Ryu, S. H., Kim, T. H., “Realization Software Development of Road Profile for Multi-axial Road Simulator,” Transactions of the KSAE, Vol. 10, No. 5, pp.190-198, 2001.
 7. Hwang, S. H., Kim, H. J., Park, C. S., Choi, G. R., “Structural and Dynamic Analysis of Three-Axis Road Simulator,” Transactions of the KSAE, Vol. 11, No. 5, pp.105-111, 2003.
 8. Cho, C. H., Lee, J. K., Park, J. K., Cho, B. K., Song, S. J., Han, K. J., “Computer Simulation of Dynamic Response of Vehicles on Rough Ground,” Transactions of the KSME, Vol. 12, No. 3, pp.419-425, 1988.
 9. Moon, I. D., Oh, J. Y., Oh, S. H., “The Effects of the Mounted Method of Frame of a Large Truck on Handling Performance,” Transactions of the KSPE, Vol. 21, No. 8, pp.112-119, 2004.