

차량/타이어 진동특성 해석을 위한 VPG 차량 모델 개발에 관한 연구

A Study on the Development of the VPG Vehicle Dynamics Model to Analyze Vibration Characteristics of Vehicle and Tire

권성진[†] · 김완수* · 배철용* · 김찬중* · 이동원* · 이봉현*

Seong-Jin Kwon, Wan-Soo Kim, Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim, Dong-Won Lee, Bong-Hyun Lee

Key Words : Virtual Proving Ground(가상 주행 시험장), Vehicle Dynamics Model(차량동역학 모델), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Vibration Characteristics(진동특성), Tire Model(타이어 모델), Shimmy(쉬미), Shake(쉐이크)

ABSTRACT

With the advancement of computer aided engineering and computer aided testing, vehicle dynamics simulation linked up with virtual testing laboratory(VTL) and virtual proving ground(VPG) technologies has become a useful method for analyzing numerous dynamic performances and diverse noise/vibration characteristics. In this study, the VPG vehicle dynamics model including the multi-body vehicle model and the semi-empirical tire model has been developed to investigate vibration characteristics such as shimmy and shake phenomena. For the purpose, the whole vehicle parameters, each vehicle's part parameter, and part connecting elements such as spring, damper, and bush, and tire model properties were measured by an experiment to accomplish the accurate vehicle dynamics model. With the developed vehicle model and tire model, it has been proved that the VPG vehicle dynamics model is effective and adequate for the study of shimmy & shake vibration characteristics.

1. 서 론

최근의 CAE(Computer Aided Engineering)와 CAT(Computer Aided Testing)를 기반으로 한 VTL(Virtual Testing Laboratory) 기술과 VPG(Virtual Proving Ground) 기술은 실차 주행시험을 대신하고 가상의 공간에서 차량의 각종 주행시험을 수행하여 설계 및 해석에 필요한 데이터를 얻을 수 있는 획기적인 기술이다⁽¹⁾. 이러한 기술은 차량 개발기간을 단축하고 소요 비용을 절감시킬 수 있으며 실차시험의 극한 상황에 대한 위험부담을 줄일 수 있기 때문에 디지털정보시스템 및 차량 전산역학 기술의 진보와 더불어 매우 유용한 방법으로 인식되고 있다.

VPG 기술을 활용한 차량/타이어 연계 동특성 해석 및 진동특성 해석을 수행하기 위해서는 정확한 차량동역학 모델(vehicle dynamics model) 및 설계 특성 파라미터가 필

수적이며, 해석의 효율성 및 실시간성을 확보하기 위해 빠른 계산시간이 요구된다. 또한 주행 중 노면으로부터 가친을 받는 타이어는 차량의 비선형성을 증가시키는 가장 중요한 인자이며, 타이어에서 발생한 힘이 차체의 운동을 발생시키므로 차량의 주행 동특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 VPG 기술에서는 실제 타이어의 다양한 운동 특성을 정확히 표현할 수 있는 신뢰성 있는 타이어 모델(tire model)이 필수적이다⁽²⁾.

차량/타이어 연계 동특성 및 진동특성 해석을 위한 차량 동역학 모델⁽³⁾⁽⁴⁾은 해석 목적, 용도 및 취득 가능한 데이터에 따라 운동 자유도가 작은 선형 모델(linear model)에서부터 ADAMS, DADS, RecurDyn 등의 상용 소프트웨어를 활용하여 자유도가 수십에서 수백에 이르는 다물체 동역학 모델(multi-body dynamics model), 그리고 부품 특성이 아닌 시스템 특성 데이터에 의한 집중 질량 모델(lumped mass model) 등이 있다. 차량 성능의 정적/동적 특성 분석을 위한 해석적 타이어 모델⁽⁵⁾⁽⁶⁾은 연구목적에 따라 다양하게 개발되어 적용되어 왔다. 이러한 타이어 모델은 타이어 구조 모델링에 근거한 이론적 모델(analytical model)과 완제품 타이어의 단품 특성 시험에 의한 실험적 모델

[†] 자동차부품연구원 에너지부품연구센터
E-mail : sjkwon@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3337, Fax : (041) 559-3070

* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

(empirical model), 앞서의 두 모델이 조합된 반실험적 모델(semi-empirical model)로 구분된다.

다물체 차량동역학 모델과 해석적 타이어 모델을 이용한 VPG 해석에서는 차량의 다양한 거동 및 진동특성을 정확히 해석할 수 있으나 차량 및 타이어의 자세한 특성 및 수많은 파라미터가 정확히 요구되며 신차 개발 시 튜닝 과정이나 여러 차량의 특성 평가 등에 어려운 단점이 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 차량/타이어 연계 동특성 해석 및 진동특성 해석을 위하여 앞서 언급한 바와 같이 다물체 차량동역학 모델의 단점을 보완하고 대상차량 및 타이어의 정확한 파라미터와 특성치를 도출하여 차량의 거동 및 진동특성의 해석 정확도를 확보하고자 하였다. 이를 위하여 대상차량에 대한 차체, 현가계, 조향계, 구동계, 제동계 및 차륜을 포함한 VPG 기반 전차량 다물체 동역학 모델을 구성하였다. 이때, 스프링, 댐퍼, 부쉬는 별도의 특성 시험을 수행하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하고자 하였으며, 타이어 모델의 특성 파라미터는 별도의 다양한 타이어 특성 시험을 통한 데이터를 적용하였다.

이를 바탕으로 차량이 100~130 km/hr 속도 대역에서 조향 휠이 원주방향으로 진동하는 쉬미(shimmy), 수직과 종방향으로 진동하는 셰이크(shake) 현상⁽⁸⁾에 대한 VPG 차량동역학 모델의 진동특성 해석을 수행하였다. 또한 해석 결과는 대상차량에 대한 실차 주행시험 결과와 비교분석하여 최종적으로 VPG 차량동역학 모델의 신뢰성을 확보하였다.

2. VPG 차량 모델 구성

2.1 차량 및 부품별 특성 파라미터

본 연구에서는 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 MSC Adams/Car를 이용하여 VPG 해석 기반 차량동역학 모델을 구성하였다. 이를 위하여 Table 1과 같은 1,600cc 급 소형 승용차량을 대상차량으로 선정하였으며, 대상차량의 3차원 측정 형상데이터를 이용하여 차량 부품간 기구학적 연결지점인 하드포인트(hard point)를 추출하였다.

또한 대상차량을 구성하는 각 부품의 3차원 형상데이터를 바탕으로 강체 부품 모델은 재료 물성치를 부가하여 구성하였고, 스테빌라이저 바(stabilizer bar)와 토션 빔 액슬(torsion beam axle)과 같은 유연체 부품 모델은 유한요소모델 및 정규 모드해석 결과를 이용하여 구성하였다. 이와 같은 강체 및 유연체 부품 모델의 진동특성을 검증하기 위하여 이론적 모드해석과 실험적 모드해석을 각각 수행하였으며, 각 부품의 고유진동수, 고유모드, MAC(Modal Assurance Criteria), 질량 등을 비교분석하여 해석 모델의 타당성을 입증하였다.

대상차량에 대한 전차량 다물체 동역학 모델은 Fig. 1과 같이 강체 부품 및 유연체 부품 모델 사이의 하드포인트에

Table 1 Specification of the target vehicle

specification	1.6 VVT	
piston displacement	1,599cc	
max. power	112ps / 6,000rpm	
max. torque	14.8kgm / 4,500rpm	
suspension	front	McPherson strut
	rear	torsion beam axle
brake	front	ventilated disc
	rear	solid disc
steering	rack & pinion	
transmission	4-speed automatic	
tire size	195/55 R15	
curb vehicle weight	1,093kg	



Fig. 1 Construction of the vehicle dynamics model

구속조건 및 경계조건, 연결 힘 및 운동을 정의하여 차량 기능별 템플릿(template) 및 서브시스템(subsystem)을 우선 구성하고 최종적으로 차량 어셈블리(assembly)를 구성하였다.

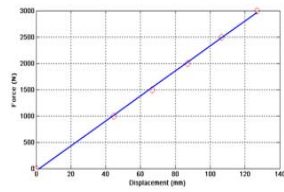
2.2 스프링, 댐퍼, 부쉬 모델

다물체 차량동역학 모델의 해석 정확도를 높이기 위해서는 차량 모델에 적용되는 각 부품들을 지지하고, 연결시켜 주는 연결요소들의 정확한 동특성이 반영되어야 한다. 이는 차량의 동특성 및 진동특성 해석에 있어서 차량의 각 부품을 연결하거나 지지하고, 차량의 움직임을 제어하는 중요한 역할을 담당하기 때문이다. 대상차량에서 이러한 연결부품으로는 스프링(spring), 댐퍼(damper), 부쉬(bush)가 있다.

스프링 특성시험은 단축 액추에이터를 이용하여 대상차량에 적용된 코일스프링에 대하여 선형구간내에서 스프링의 강성을 측정하였다. 댐퍼 특성시험은 댐퍼 전용시험기를 통하여 일정 주파수 조건의 댐퍼 압축과 인장상태에서 속도를 변화시키며 하중, 변위, 속도를 측정하였다. 또한 부쉬 특성시험은 부쉬 동특성 전용 시험장비를 이용하여 동강성을 측정하여 회귀곡선을 계산한 후, 이를 차량동역학 모델에 반영하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행한 스프링, 댐퍼, 부쉬 특성시험의 대표적인 결과를 나타낸다.



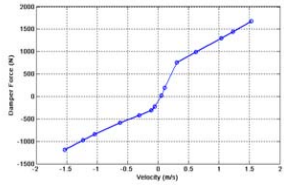
(a) Front spring



(b) Test result



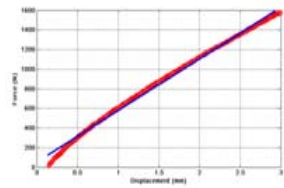
(c) Front damper



(d) Test result



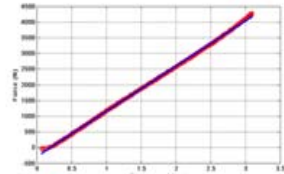
(e) Subframe bush



(f) Test result



(e) Torsion beam bush



(e) Test result

Fig. 2 Spring, damper, and bush characteristics

2.3 다물체 동역학 차량 모델 구성

본 연구에서는 VPG 기반 전차량 다물체 동역학 모델을 구성하기 위하여 대상차량에 대하여 차체, 현가계, 조향계, 구동계, 제동계 및 차륜 등을 포함한 8개의 템플릿과 9개의 서브시스템을 구축하였다. 이를 통하여 최종적인 대상차량의 어셈블리 모델을 구성하였다.

차량의 기능별 템플릿에서 부품간 연결관계는 기구학적으로 자유도를 제한하는 다양한 종류의 조인트와 운동역학적으로 강성과 댐핑을 이용하여 부품간 작용 힘을 정의하는 부쉬를 사용하였다. 또한 스프링, 댐퍼, 부쉬는 앞서의 특성 시험 결과를 적용하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하였다. 차량 및 타이어 특성 파라미터 및 서브시스템별 특성 파라미터는 별도의 시험 및 해석을 통해 도출하여 궁극적으로 정확한 전차량 모델을 구성하고자 하였다. Table 2는 본 연구에서 구성한 대상차량의 자유도 및 모델링 요소를 나타낸다.

차량 기능별 각 템플릿 및 서브시스템간의 구속조건 및 연결관계는 다양한 종류의 커뮤니케이터(communicator)를 설정하여 최종적인 전차량 어셈블리 모델을 구성하였다. Fig. 3은 전륜 현가계의 입력 및 출력 커뮤니케이터 설정관

계를 대표적으로 나타내었다. Fig. 4는 본 연구에서 최종적으로 구성한 다물체 동역학 차량 모델의 하드포인트와 부품간 구속조건의 위치 등을 표기한 그림이며, 본 연구에서 설정한 직교좌표계를 동시에 나타내었다.

Table 2 Composition of model elements

modeling elements		No.
degrees of freedom		53
moving parts		60
forces	springs	4
	dampers	4
	bushings	19
joints	cylindrical joints	6
	revolute joints	9
	spherical joints	8
	translational joints	3
	convel joints	6
	fixed joints	24
	hooke joints	9
	inline primitive joints	1
	inplane primitive joints	1
	parallel Axis primitive joints	1
	perpendicular primitive joints	5
	couplers	2
	motions	3

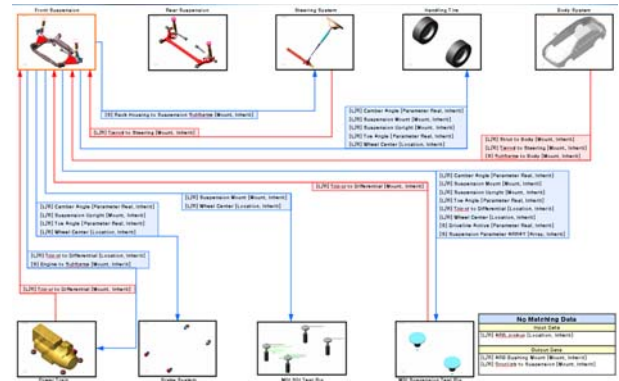


Fig. 3 Communicators map for the front suspension

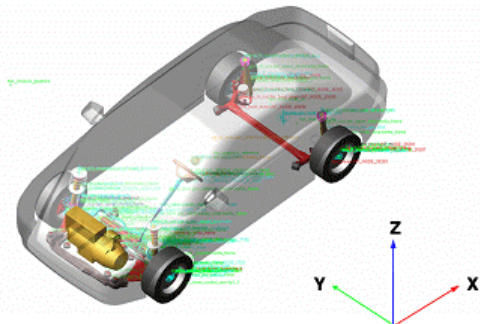


Fig. 4 VPG based vehicle dynamics model

3. 타이어 모델 구성

3.1 MF-swift 타이어 모델

본 연구에서는 VPG 해석 기반 차량/타이어 연계 동특성 및 진동특성 해석을 위하여 반실험적 타이어 모델인 MF(Magic Formula)-swift 타이어 모델을 대상으로 타이어 모델을 구성하였다. MF-swift 타이어 모델⁽⁹⁾은 기존 MF 타이어 모델을 확장한 것으로 타이어 벨트(belt)를 강제 운동으로 가정하여 타이어의 진동특성을 모사할 수 있다. 벨트 강제 운동의 모드별 유효 주파수는 횡방향 60Hz, 종방향 및 전후방향 100Hz까지 가능한 특성이 있다. 또한 이러한 타이어 모델은 타이어 거동 특성을 분석하기 위하여 정상 상태(steady state) 슬립, 강제 링(rigid ring), 3D 접촉(contact), 엔벨로핑(enveloping) 특성을 모두 반영할 수 있다⁽⁵⁾.

3.2 타이어 특성 시험

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 195/55 R15 타이어를 대상으로 다양한 타이어 특성 시험을 통한 해석적 타이어 모델을 구성하였다. 타이어 특성 시험은 연구목적에 따라 다양하게 분류될 수 있으나, 본 연구에서는 SAE(Society of Automotive Engineers) 규정에 의거한 모달, 관성, 강성, 힘&모멘트, 엔벨로핑, 돌기 승월 시험 등을 각각 실시하였다. 타이어의 시험 조건으로 기준 하중은 4186N, 기준 공기압은 2.28bar, 적용 림은 15×6.0J를 사용하였다. Table 3은 대상 타이어의 모달 시험 결과로 무하중 및 부하하중 조건에서의 고유주파수를 나타내었다.



(a) pattern shape (b) alloy wheel

Fig. 5 Target tire

Table 3 Natural frequency of the tire

mode		frequency
unloaded	torsion	39.7
	radial translation	87.3
	lateral translation	42.5
	pitch rotation	56.7
loaded	longitudinal	57.5
	vertical	93.4
	lateral tilt	50.0
	steer	67.1

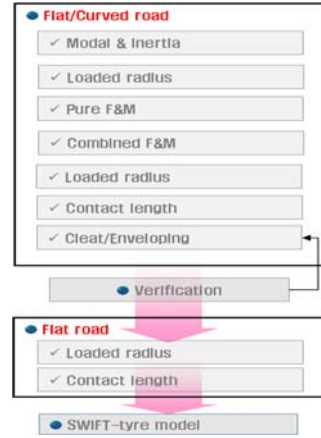


Fig. 6 Fitting process of the MF-swift tire model

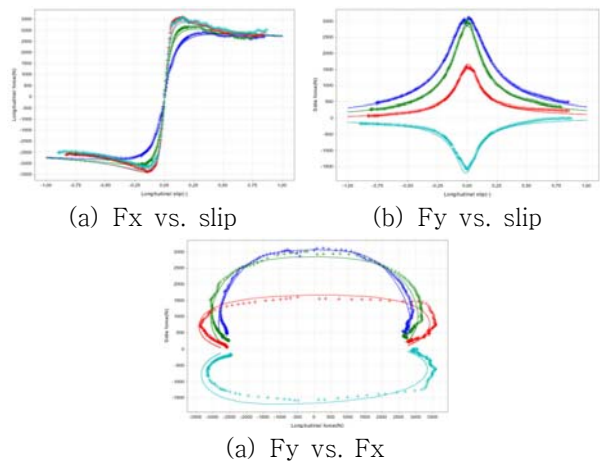


Fig. 7 Tire forces at combined slip condition

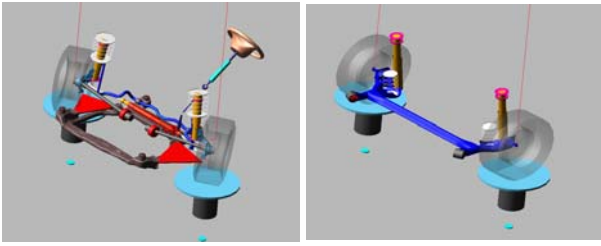
3.3 타이어 모델링

본 연구에서 선정된 반실험적 타이어 모델인 MF-swift 타이어 모델의 파라미터 및 프로퍼티 특성을 정의하기 위하여 앞서 수행한 다양한 타이어 특성 시험 데이터를 바탕으로 MF-swift 타이어 모델을 구성하였다. 이를 위하여 타이어 특성 시험 데이터인 힘&모멘트, 슬립 데이터, 동하중 반경, 유효하중 반경, 모달, 엔벨로핑, 저속/고속 돌기 승월 시험 데이터를 기반으로 MF-swift 타이어 모델 피팅 프로세스를 Fig. 6과 같이 수행하였다. 최종적으로 도출된 대상 타이어에 대한 MF-swift 타이어 모델의 특성은 Fig. 7과 같다.

4. 슈미/셰이크 잔동특성 해석

4.1 기구정역학 해석 결과

대상차량의 진동특성 해석을 수행하기 이전에 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 대상차량의 기구정역학 해석(kinematics & compliance analysis)을 수행하여, 차량동역학 모델의 기하학적 움직임과 정적 평형을 확인하였다.



(a) Front suspension (b) Rear suspension
Fig. 8 Kinematics and compliance analysis model

이를 통하여 차량 모델에 대한 거시적 관점에서 차량 모델을 구성하는 60개 단품은 기구학적 잠김이나 과도한 구속조건으로 인한 오류가 발생하지 않았으며, 대상차량의 현가계 특성을 정확히 반영함을 알 수 있었다.

4.2 쉬미/쉐이크 진동특성

앞서 개발된 VPG 기반 차량동역학 모델과 타이어 모델을 바탕으로 본 연구에서는 대상차량의 진동특성 분석을 위하여 조향계 진동현상인 쉬미와 쉐이크 해석을 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 9와 같이 너클, 랙 하우징, 조향 휠에 센서를 모델링하여 3축 가속도 데이터를 계측하였으며, VPG 해석을 위한 운전자 모델과 도로노면 모델을 설정하였다.

차량에 있어서 타이어는 도로노면과 유일하게 접지하는 부품으로 쉬미와 쉐이크 현상의 발생에 밀접한 관련을 맺고 있다. 쉬미는 차량이 100~130 km/hr 속도 대역에서 타이어의 1차 회전주파수에 따른 조향 휠의 원주방향 진동현상이며, 쉐이크는 조향 휠의 수직방향 및 종방향 진동현상이다. 이와 같은 쉬미와 쉐이크의 가진원은 주로 타이어의 불균형(imbalance)이며, 차량의 현가계 및 조향계를 통해 진동이 전달되는 특성이 있다.

본 연구에서는 쉬미와 쉐이크의 발생에 있어 가장 큰 가진원으로 작용하는 타이어 불균형의 모사를 위하여 앞서 구성한 타이어 모델에 불평형 질량 30g을 부착하여 쉬미와 쉐이크의 진동특성과 영향력을 분석하였다.

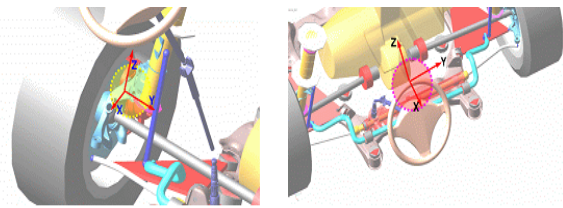
4.3 진동특성 해석 결과

쉬미와 쉐이크 진동특성을 분석하기 위하여 운전자 모델은 120 km/hr 정속주행 모드(constant velocity mode)와 130 km/hr에서 타행주행 모드(coast-down mode)를 각각 설정하였다. 시뮬레이션 시작 후, 워밍업 시간을 각각 3s, 5s 설정하여 해석의 안정성을 확보하였다.

정속주행 모드에서의 VPG 해석 기반 차량동역학 해석 결과는 Fig. 10에서와 같이 타이어의 불평형 질량에 따라 조향 휠이 진동하는 현상을 나타내었다. 또한 Fig. 11과 같이 너클과 조향 휠에서 계측된 가속도 데이터를 종방향(X), 횡방향(Y), 수직방향(Z)에 따라 각각 주파수 분석을 수행하였다. 주파수 분석 결과, 쉬미와 쉐이크 진동현상은 약 18Hz

의 주파수 구간에서 발생하며, 타이어와 가까운 너클에서는 종방향 및 수직방향 가속도 성분이, 운전자가 감지하는 조향 휠에서는 쉬미 진동방향인 횡방향 가속도 성분이 크게 발생함을 알 수 있었다.

타행주행 모드에서 쉬미와 쉐이크 진동해석 결과는 전반적으로 정속주행 모드에서의 결과와 유사하며, Fig. 12와 같이 차량의 속도가 감소함에 따라 쉬미와 쉐이크 발생 주파수 성분 및 가속도의 크기도 감소함을 알 수 있었다. 너클에서 가속도 성분은 Z방향 > X방향 > Y방향과 같이 나타났으며, 조향 휠에서의 가속도 성분은 Y방향 > X방향 >



(a) knuckle (b) steering wheel
Fig. 9 Positions of accelerometers

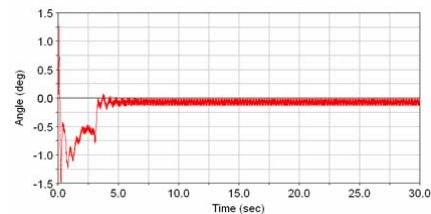


Fig. 10 Vibration characteristics of steering angle

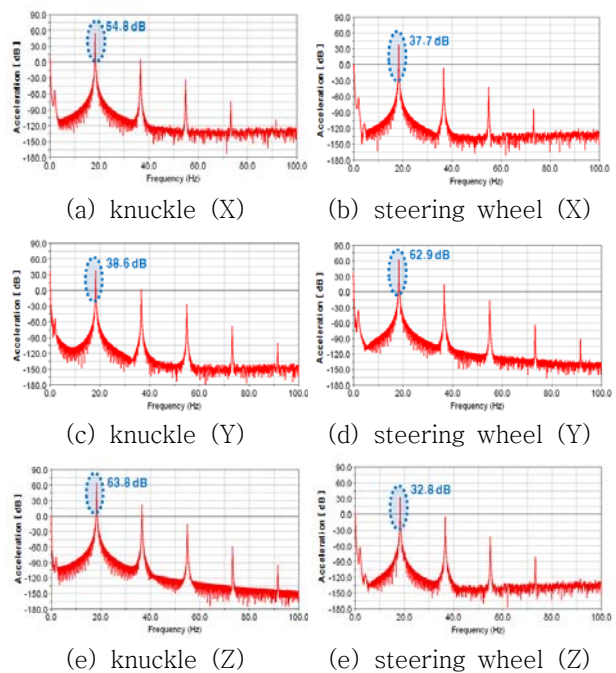


Fig. 11 Acceleration analysis at constant velocity

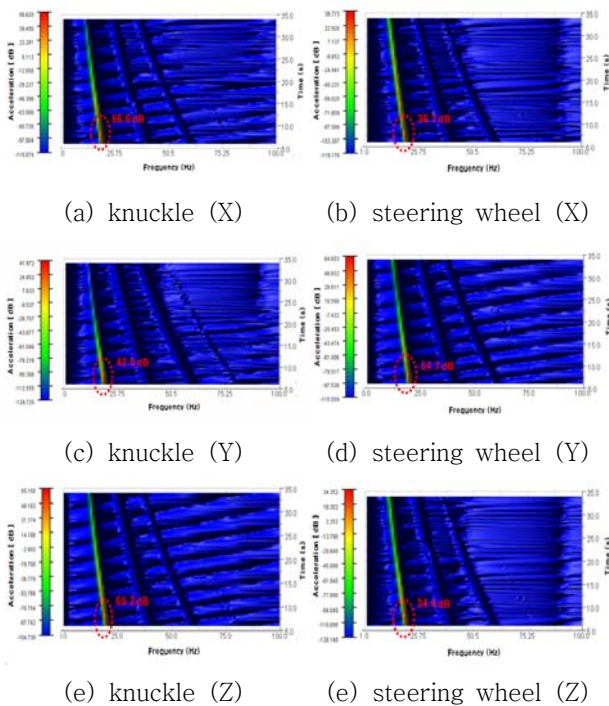


Fig. 12 Acceleration analysis at coast-down

Z방향과 같이 분석되었다. 이와 같은 VPG 차량동역학 모델 기반 쉬미와 웨이크 해석 결과는 사전연구⁽¹⁰⁾에서 수행한 실차 주행시험 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성 및 신뢰성을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량/타이어 연계 동특성 해석 및 진동특성 해석을 수행하기 위하여 다물체 차량동역학 모델과 해석적 타이어 모델을 개발하였다. 이를 위하여 대상차량 및 타이어에 대한 차체, 현가계, 조향계, 구동계, 제동계 및 차륜을 포함한 VPG 기반 전차량 다물체 동역학 모델을 구성하였다. 또한 스프링, 댐퍼, 부쉬와 같은 연결요소는 별도의 특성시험을 통하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하였으며, 타이어 모델의 파라미터 및 프로퍼티 특성을 도출하기 위하여 다양한 타이어 특성시험을 수행하였다.

전체 53자유도로 구성된 전차량 다물체 동역학 모델을 바탕으로 본 연구에서는 기구정역학 해석 및 쉬미/웨이크 진동특성 해석을 수행하여 대상차량의 운동 및 진동특성을 해석하였다. 이를 위하여 별도의 센서를 모델링하여 가속도 데이터를 계측하였으며, VPG 해석을 위한 운전자 모델과 도로노면 모델을 설정하였다.

쉬미와 웨이크 진동특성 해석 결과, 쉬미와 웨이크는 타이어의 1차 회전주파수에 따른 조향 휠의 진동현상으로 가진원은 주로 타이어의 불균형이고 차량의 현가계 및 조향계를 통해 진동이 전달되는 특성을 가짐을 알 수 있었다. 또

한 타이어와 가까운 너클에서는 종방향 및 수직방향 가속도 성분이, 운전자가 감지하는 조향 휠에서는 쉬미 진동방향인 횡방향 가속도 성분이 크게 발생함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 VPG 차량동역학 모델은 차량/타이어 연계 동특성 및 진동특성을 분석할 수 있는 모델로 적용이 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Min. S. K., 1999, "Vehicle - Commerce at Light Speed", Moonwon Press.
- (2) Jung, H. K., and Kim, S. S., 2005, "Development of an Efficient Vehicle Dynamics Model Using Massless Link of a Suspension", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.13, No.1, pp.99-108.
- (3) Son, S. H., and Heo, S. J., 2003, "Virtual Durability Test Procedures and Applications on Design of a Vehicle Suspension Module", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.11, No.4, pp.144-150.
- (4) Kwon, S. J., Bae, C. Y., Kim, C. J., Lee, B. H., Koo, B. K., and Rho, G. H., 2007, "A Study on the Development of the VTL Vehicle Dynamics Model to Analyze Vibration Characteristics", Autumn Conference Proceedings of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, KSNVE07A-15-04 CD.
- (5) Koo, B. K., Rho, G. H., Kwon, S. J., and Lee, B. H., 2007, "Semi-empirical Tire Modeling for the Study of Dynamic Characteristics", Autumn Conference Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.2, pp.1132-1137.
- (6) Maurice, J. P., 2000, "Short Wavelength and Dynamic Tyre Behaviour under Lateral and Combined Slip Conditions", Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology.
- (7) Pacejka, H. B., 2002, "Tire and Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers.
- (8) Kageyama, I., and Emoto, K., 1995, "On a Modeling of Shimmy Phenomenon for Two Wheeled Vehicles", SAE Paper No. 951807.
- (9) TNO, 2005, "MF-tyre 5.2 & MF-swift 6.0 User Manual".
- (10) Bae, C. Y., Kwon, S. J., Kim, C. J., Lee, B. H., Koo, B. K., and Rho, G. H., 2007, "The Study on the Influence Analysis of Shimmy&Shake due to Tire Design Parameters", Autumn Conference Proceedings of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, KSNVE07A-15-05, CD.