

차량 진동특성 해석을 위한 VTL 차량 모델 개발에 관한 연구

A Study on the Development of the VTL Vehicle Dynamics Model to Analyze Vibration Characteristics

권성진† · 배철용* · 김찬중* · 이봉현* · 구병국** · 노국희**
Seong-Jin Kwon, Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee,
Byoung-Kook Koo, and Guck-Hee Rho

Key Words : Vibration Characteristics(진동특성), Virtual Testing Laboratory(가상 시험실), Vehicle Dynamics(차량동역학), Multi-body Dynamics(다물체 동역학), Kinematic & Compliance Analysis(기구정역학 해석)

ABSTRACT

Nowadays, with the advancement of computational mechanics, and vehicle dynamics simulation linked up with virtual testing laboratory(VTL) and virtual proving ground(VPG) technologies has become a useful method for analyzing numerous driving performances and diverse noise/vibration characteristics. In this paper, the analytical vehicle model based on multi-body dynamics theory was developed to investigate the vibration characteristics according to various road conditions. For the purpose, the whole vehicle parameters, each vehicle's part parameter, and part connecting elements such as spring, damper, and bush were measured by an experiment. Also, the vehicle dynamics model, which includes the front suspension, rear suspension, steering, front wheel, rear wheel, and body subsystems has been constructed for computer simulation. With the developed vehicle dynamics model, three forces and three moments measured at each wheel center were applied to evaluate and analyze dynamics and vibration characteristics for miscellaneous road conditions.

1. 서론

최근의 CAE(Computer Aided Engineering)와 가상공학(virtual engineering)을 기반으로 한 VTL(Virtual Testing Laboratory) 기술과 VPG(Virtual Proving Ground) 기술은 가상의 공간에서 차량의 각종 주행시험을 수행하여 차량 개발기간을 단축하고 소요 비용을 절감시킬 수 있는 획기적인 기술이다⁽¹⁾. 또한 이러한 기술은 실차시험의 극한 상황에 대한 위험부담을 줄일 수 있기 때문에 컴퓨터 성능의 향상 및 차량 전산역학 기술의 진보와 더불어 매우 유용한 방법으로 인식되고 있다.

이와 같은 기술을 활용한 차량 동특성 해석 및 진동특성 해석을 수행하기 위해서는 정확한 수학적 차량동역학 모델

및 설계 특성 파라미터가 필수적이며, 해석의 효율성 및 실시간성을 확보하기 위해 빠른 계산시간이 요구된다⁽²⁾.

일반적인 차량 및 주요 부품의 동특성 및 진동특성 해석을 위한 수학적 차량동역학 모델(vehicle dynamic model)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⁽³⁾.

다물체 동역학 이론을 이용하여 차량동역학 모델의 자유도가 높을 경우⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 차량의 다양한 거동 및 진동특성을 정확히 해석할 수 있으나 샤시 부품의 자세한 특성 및 수많은 파라미터가 정확히 요구되며 신차 개발 시 튜닝 과정이나 여러 차량의 특성 평가 등에 어려운 단점이 있다. 이러한 다물체 동역학 모델은 강체 다물체 동역학 모델(rigid multi-body dynamics model)과 유연 다물체 동역학 모델(flexible multi-body dynamics model)로 나눌 수 있

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

* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

** 넥센타이어(주) 기술연구소

으며, 유연 다물체 동역학 모델은 다시 모드 좌표(modal coordinate)를 이용하는 방법과 절점 좌표(nodal coordinate)를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 반면 집중 질량 모델을 이용하여 차량동역학 모델의 자유도가 낮을 경우⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 다물체 동역학 모델에 비하여 차량 거동 및 진동특성 해석에 한계가 있지만, 적은 수의 파라미터로 효율적인 계산이 가능하며 능동형 시스템 개발에 용이하게 적용할 수 있다.

본 연구에서는 차량 동특성 해석 및 진동특성 해석을 위하여 앞서 언급한 바와 같이 다물체 동역학 차량 모델의 단점을 보완하고 대상차량의 정확한 파라미터와 부품별 특성치를 도출하여 차량의 거동 및 진동특성의 해석 정확도를 확보하고자 하였다. 이를 위하여 대상차량의 현가계, 조향계, 제동계 등의 주요 샤시 시스템을 포함한 차량 및 주요 부품의 VTL 해석 기반 차량동역학 모델을 개발하였다. 이때, 스프링, 댐퍼, 부쉬는 별도의 특성시험을 수행하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하였으며, 대상차량의 하중 및 다양한 차량 특성 파라미터를 도출하여 고정밀 전차량 모델을 구성하였다.

또한 구성된 VTL 차량 모델의 동특성 해석을 수행하기 위하여 대상차량의 다양한 노면조건에 따른 휠 하중을 이용하여 차량 및 주요 부품의 운동 및 진동 특성을 분석하였다. 이를 위하여 대상차량에 대한 주행하중 및 진동측정 시험을 수행하였으며, 차량 모델의 동특성 해석 결과와 시간역 및 주파수역 응답을 비교분석하여 최종적으로 VTL 기반 다물체 동역학 차량 모델의 해석 신뢰성을 확보하였다.

2. 주행하중 및 진동측정 시험

2.1 대상차량

본 연구에서는 대상차량으로 현재 양산 중인 중형 승용차를 선정하였으며, 대상차량의 주요 제원은 Table 1과 같다. 대상차량에 대한 실차 주행시험은 두 가지 측면에서 수행되었다. 첫 번째는 차량동역학 모델의 입력데이터 생성을 위해 차량의 각 차륜의 중심부에 WFT(Wheel Force Transducer)를 이용하여 3축 방향에 대한 휠 하중과 모멘트를 측정하는 것이고, 두 번째는 차량동역학 모델의 신뢰성 검증을 위하여 대상차량 후륜부의 스프링, 트레일링 암, 어시스트 암에 스트레인 게이지를 이용하여 차량 주행 중 발생하는 진동하중을 측정하는 것이다.

2.2 계측시스템 구성

대상차량에 대한 주행하중 및 진동측정 시험은 자동차부품연구원 주행시험장(proving ground) 내의 벨지안로 및 단차로에서 20~60km/hr 구간에서 10km/hr 단위로 정속 주행시험을 수행하였다. 적용된 특수로는 주행 시 샤시 시스템에 큰 충격을 가하여 차량의 동특성 확인이 용이하다.

Table 1 Specification of test vehicle

Piston displacement	2,700 cc (V6 DOHC)
Transmission	A/T (5 step)
Suspension	FR : Double wishbone RR : Multi-link
Brake	FR : Ventilated Disc RR : Solid Disc
Tire Size	225/50 R17
Weight	1,603 kg



Fig. 1 Measurement sensor and position

Fig. 1은 대상차량의 각종 측정 센서 및 장착위치를 도시한 것이다. 본 연구에서는 휠 하중 및 모멘트를 측정하기 위해 WFT를 각 차륜에 장착 하였으며, 일정한 시험속도를 유지하기 위하여 GPS 타입의 속도계를 별도로 장착하였다. 또한 차량 모델의 전체 경계조건 설정을 위하여 대상차량의 C.G. 부위에 자이로센서를 설치하여 차량 주행 시 발생하는 3축 방향의 가속도 신호와 roll, pitch, yaw 신호를 측정하였다.

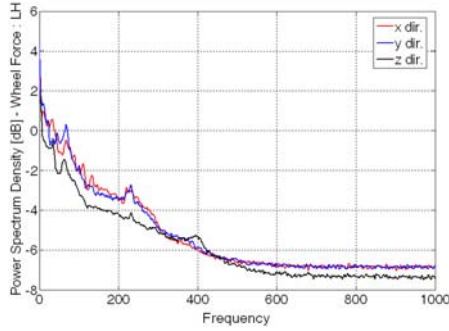
차량동역학 모델의 신뢰성 검증을 위하여 본 연구에서는 후륜부의 스프링, 트레일링 암, 어시스트 암에 스트레인 게이지를 장착하여 주행 중 발생하는 하중을 측정하였다. 각 측정위치는 타이어에서 가진된 노면의 가진력이 차량에 전달되는 전달경로 상의 요소부품으로 선정하였다. 또한 스트레인 게이지의 경우, 실차 주행시험 이전에 해당 부품에 스트레인 게이지를 장착하여 단위하중 당 발생하는 스트레인 게이지의 민감도 값을 측정하여 신호 분석에 사용하였다.

2.3 측정신호 분석

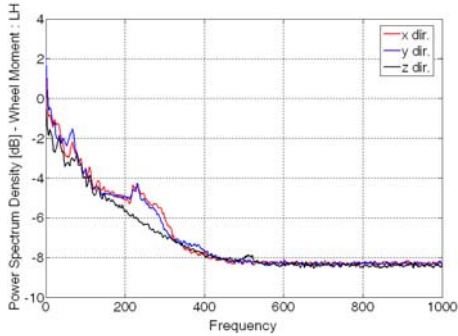
실차 주행시험을 통하여 측정된 데이터는 DAQ(data acquisition) 장비 내에서 측정센서에 적합한 단위로 저장되기 때문에 시간영역을 통하여 데이터의 경향성을 파악할 수 있다. 또한 이러한 시간영역의 응답 데이터들은 차량동역학 모델의 입력데이터 및 신뢰성 검증을 위해 사용된다.

Fig. 2는 전륜 휠 중심에서 측정된 시간영역에서의 하중 데이터를 후처리 하여 PSD(Power Spectrum Density)의 형태로 도시한 결과이다. 지면의 한계상 벨지안로에서 30km/h 정속주행에 대한 결과를 도시하였다.

PSD의 경우 파워 스펙트럼을 주기로 나누어주는 신호처리 과정을 거치기 때문에 단위 Hz당 발생하는 에너지양을 비교하기 좋은 장점을 지닌다. 시험결과에서 100Hz 이하의 저주파 대역에 많은 에너지가 집중되어 있으며, 특히 10Hz 영역에서의 현가계 진동이 주요한 주파수 성분으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 차량에 가진되는 주파수 대

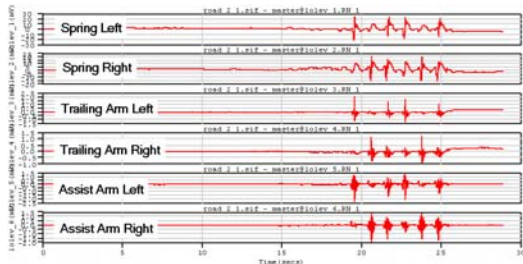


(a) Wheel force(left)

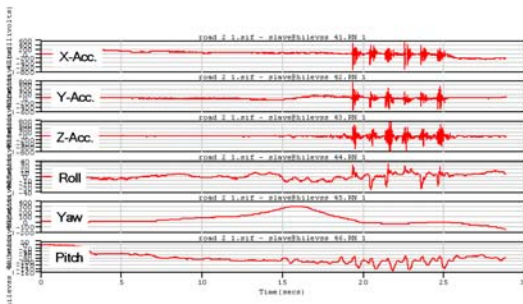


(b) Wheel moment (left)

Fig. 2 PSD Result at front wheel center



(a) Spring, trailing arm and assist arm force



(b) Acceleration and angle at gyro

Fig. 3 Signals at gyro and each vehicle part

역도 100Hz 미만의 저주파 가진이 주요한 성분임을 알 수 있으며, 제동계 및 현가계 부품의 경우 이러한 주파수 대역을 회피한 설계 방안이 필요함을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 후륜 현가장치를 대상으로 단차로에서 60km/h로 주행할 때 측정된 너클 주변의 스트레인 게이지에 의한 하중 데이터와 대상차량의 C.G.에서 측정된 자이로 센서의 시간영역 응답을 도시한 결과이다. 단차로에서의 시험결과는 다수의 단차 영역을 통과하는 과정에서 좌/우의 하중이 서로 다르게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 차량의 정적 하중이 좌/우 정대칭을 갖고 있지 않기 때문이다. 또한 자이로 센서의 응답특성의 경우 노면의 단차성분에 의한 차량의 3축 가속도 응답이 증폭됨과 동시에 롤과 피치 모션에 대한 위상차가 급격히 변화하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 각각의 시험을 통하여 측정된 데이터는 차량동역학 해석의 입력 데이터와 경계조건 형성을 위한 데이터 그리고 차량 모델의 검증데이터로 활용되어지게 된다.

3. VTL 차량 모델 구성

3.1 차량 및 부품별 특성 파라미터

본 연구에서는 MSC社 ADAMS를 이용하여 대상차량에 대한 VTL 기반 차량동역학 모델을 구성하였다. 대상차량의 구성에 가장 기본적인 위치 정보에 해당하는 하드포인트는 차량 부품간 기구학적 연결지점을 나타낸다. 본 연구에서는 대상차량의 3차원 형상 데이터를 이용하여 하드포인트를 추출하였으며, 일부 하드포인트는 실측을 통해 보완하였다. Fig. 4는 대상차량에 대한 총 158개의 하드포인트 및 부품간 구속조건의 위치와 좌표계를 나타낸다.

또한 대상차량을 구성하는 각 부품의 3차원 형상 모델을 바탕으로 강체 부품 모델은 재료물성치를 부가하여 구성하였고, 유연체 부품 모델은 유한요소모델 및 정규 모드 해석 결과를 이용하여 구성하였다. 대상차량의 부품별 형상은 Fig. 5와 같으며, 더블위시본 형식의 전륜 현가계, 멀티링크 형식의 후륜 현가계, 랙 & 피니언 형식의 조향계, 디스크 브레이크 형식의 제동계 및 구동계 등으로 구성된다.

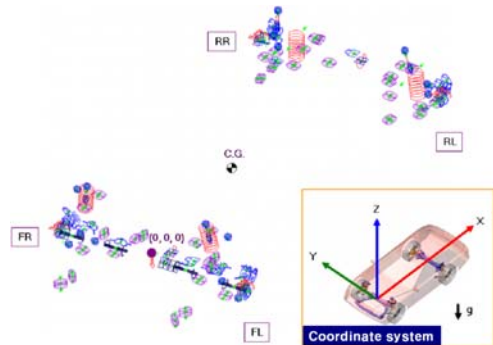


Fig. 4 Composition of hard points

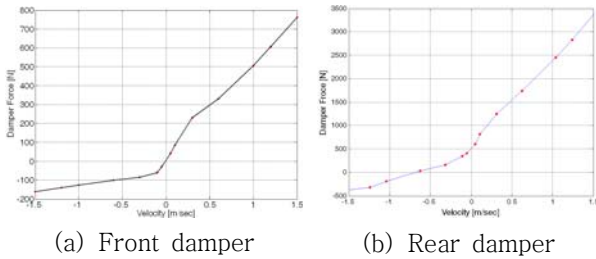


Fig. 5 Vehicle dynamic model

3.2 스프링, 댐퍼, 부쉬 특성시험

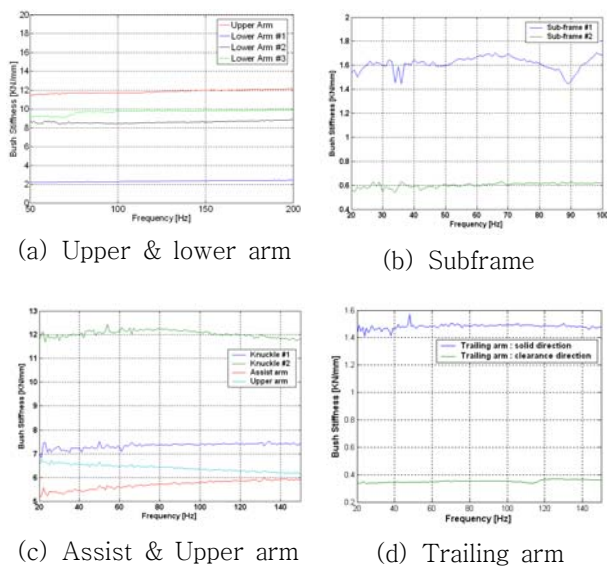
차량동역학 모델을 생성하기 위해서는 각 부품에 대한 해석 모델을 생성하는 것 외에 부품간 연결요소의 특성을 정확히 반영하여야 한다. 이는 차량의 동특성 및 진동특성 해석에 있어서 차량의 각 부품을 연결하거나 지지하고, 차량의 움직임을 제어하는 중요한 역할을 담당하기 때문이다. 차시계에 이러한 연결부품으로는 스프링과 댐퍼 그리고 부쉬가 있다.

스프링은 현가장치에서 쇼크업소버와 함께 차량을 지지하고, 주행 중 발생하는 충격을 흡수하며, 차량의 롤, 요, 피치의 운동성능에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는



(a) Front damper (b) Rear damper

Fig. 6 Dynamic Characteristics of damper



(a) Upper & lower arm (b) Subframe
(c) Assist & Upper arm (d) Trailing arm

Fig. 7 Dynamic Characteristics of bush

단축 액츄에이터를 이용하여 대상차량에 적용된 코일스프링에 대하여 선형구간내에서 스프링의 강성을 측정하여 동역학 해석모델에 적용하였다. 단품특성 시험을 통하여 전륜은 63.7N/mm, 후륜은 43.37N/mm의 강성값을 도출하였다.

차량에 적용되는 댐퍼는 차체와 바퀴 차륜 사이에 장착되어 차량의 흔들림에 대한 저항역할을 한다. 또한 스프링의 수축을 조절해 스프링의 되튐운동을 막아 줌으로써, 스프링의 복원운동을 도와주게 된다. 본 연구에서는 시험차량에 적용된 댐퍼에 대하여 댐퍼 전용시험기를 통하여 일정 주파수조건의 댐퍼 압축과 인장상태에서 속도를 변화시키며 하중, 변위, 속도를 측정하였다. Fig. 4는 댐퍼 동특성 시험결과를 나타내고 있으며, 해석모델 생성 시, 데이터를 수치적으로 보간하여 사용하게 된다.

차량의 차시계에 적용되어지는 부쉬는 진동측면에서 상당히 중요한 요소부품으로써 부쉬 특성에 따라 차량의 진동특성이 민감하게 변화하게 된다. 따라서 해석모델 생성 시 부쉬에 대한 정확한 정보를 입력시키지 않으면, 신뢰성 있는 차량의 동특성 해석결과를 확보하기 어려워진다. 이에 본 연구에서는 시험차량에 적용되어지는 각 종 부쉬에 대하여 부쉬 동특성 전용 시험장비를 이용하여 동강성을 측정하여 회귀곡선을 계산한 후, 이를 해석모델 생성 시 적용하였다. Fig. 5는 측정되어진 각 부쉬의 동강성 결과를 나타낸다.

3.3 다물체 동역학 차량 모델 구성

본 연구에서는 3차원 형상 데이터를 바탕으로 앞서 언급한 차량 특성 파라미터 및 부품별 특성 파라미터를 부가하여 단품별 강체 및 유연체 모델을 구성하였다. 그리고 단품별 구속조건 및 경계조건, 연결 힘 및 운동을 정의하여 최종적으로 차량동역학 모델을 구성하였다.

부품간 연결관계는 기구학적으로 자유도를 제한하는 다양한 종류의 조인트와 운동역학적으로 강성과 댐핑을 이용하

Table 2 Composition of model elements

		No.
Gruebler Count (DOF)		97
Moving Parts		89
Forces	Springs	6
	Dampers	4
	Bushings	36
	Motions (Gforce)	4
	Motions (Sforce)	4
Joints	Revolute Joints	10
	Spherical Joints	16
	Translational Joints	5
	Convel Joints	4
	Fixed Joints	46
Hooke Joints		8

여 부품간 작용힘을 정의하는 부쉬를 사용하였다. 또한 스프링과 댐퍼는 특성시험 데이터를 적용하여 별도의 외력으로 부가하였고, 스테빌라이저 바는 특성해석결과를 활용하여 비틀림 스프링으로 모델링하였다. 또한 동역학적 해석모델의 입력 파라미터는 실차 주행시험을 통하여 얻어진 6자유도의 휠 하중 및 모멘트를 적용하여 차량동역학 모델의 가진력을 형성하였다. Table 2는 본 연구를 통하여 생성되어진 차량 모델의 힘 요소 및 조인트 요소를 나타낸 것이다.

4. 진동특성 해석 결과

4.1 기구정역학 해석 결과

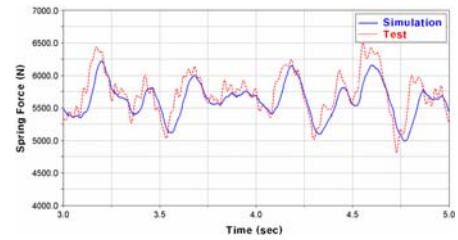
대상차량의 진동특성 해석을 수행하기 이전에 본 연구에서는 대상차량의 기구정역학 해석(kinematics & compliance analysis)을 수행하여, 차량동역학 모델의 기하학적 움직임과 정적 평형을 확인하였다. 이를 통하여 차량 모델에 대한 거시적 관점에서 차량 모델을 구성하는 89개 단품은 기구학적 잠김이나 과도한 구속조건으로 인한 오류가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

4.2 벨지안로/단차로 진동특성 결과 비교

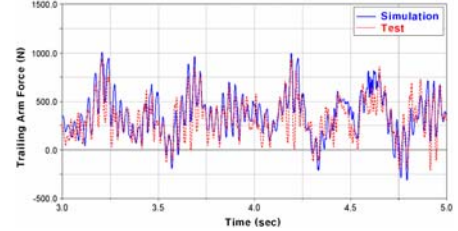
본 연구에서는 대상차량의 다양한 도로노면에 따른 주행 하중 및 진동측정 시험 데이터를 이용하여 앞서 구성한 차량동역학 모델의 동특성 및 진동특성 해석 결과와의 검증을 수행하였다. 이를 위하여 벨지안로 20km/hr와 단차로 60 km/hr에서 측정된 3방향 휠 하중과 3방향 휠 모멘트를 차량동역학 모델에 입력하였다. 또한 차량 모델의 해석 결과 중에서 실차시험 데이터와의 결과비교는 후륜 너클 주위의 스프링 하중(Z방향), 트레일링 압 하중(X방향), 어시스트 압 하중(Y방향)을 선정하였다.

Fig. 8 벨지안로에서 후륜의 좌측 차륜에서의 하중데이터를 비교한 결과를 도시한 것이고, Fig. 9는 단차로에서의 검증결과를 도시한 것이다. 차량동역학 모델의 결과는 실차시험 결과와 전반적으로 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 개발되어진 차량동역학 모델의 신뢰성을 확보할 수 있으며, 다양한 차량 및 부품의 동특성 및 진동특성을 분석할 수 있는 모델로 적용이 가능함을 알 수 있다.

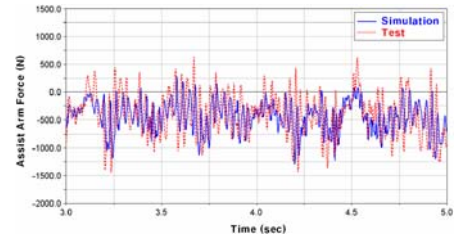
Fig. 10과 Fig. 11는 스프링, 트레일링 압 및 어시스트 압에서 측정된 하중데이터에 대한 PSD 선도의 비교/검증 결과 나타낸다. 미소구간을 제외한 전반적인 주파수 대역의 에너지 분포가 동일하게 나타남을 알 수 있다. 특히 10Hz 이하의 저주파 영역에서의 에너지 분포가 일치하고 있다. 이러한 결과는 차량 모델을 이용한 진동특성 해석 결과가 실제 차량의 주행특성을 정확히 반영하고 있음을 의미하며, 차량 및 각 부품들의 동특성 및 진동특성 분석에 적절히 활용이 가능함을 의미한다.



(a) Spring force (Z direction)

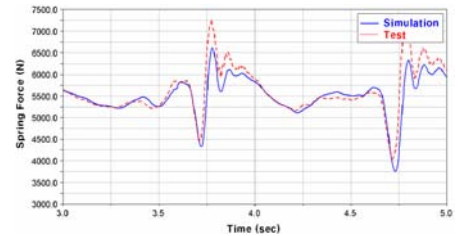


(b) Trailing arm force (X direction)

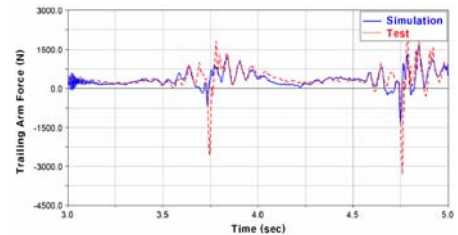


(c) Assist arm force (Y direction)

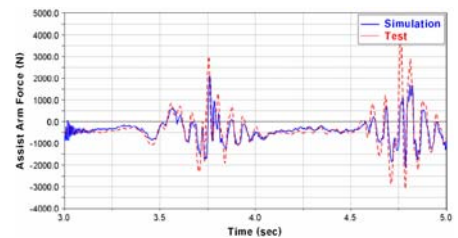
Fig. 8 Time domain result at belgian road



(a) Spring force (Z direction)

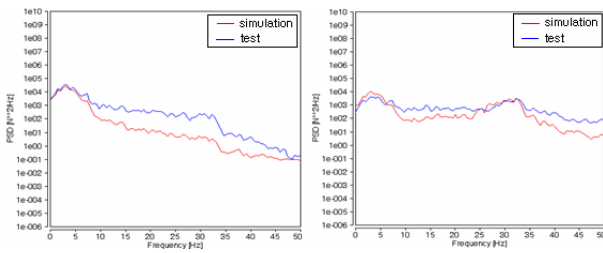


(b) Trailing arm force (X direction)

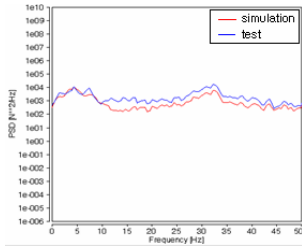


(c) Assist arm force (Y direction)

Fig. 9 Time domain result at impulse bar road

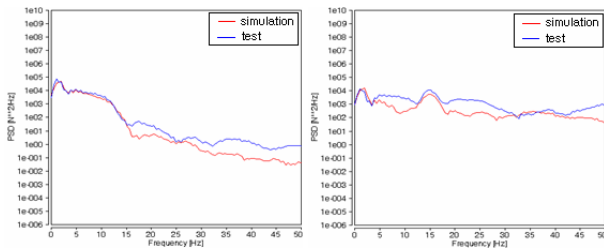


(a) Spring force (b) Trailing arm force

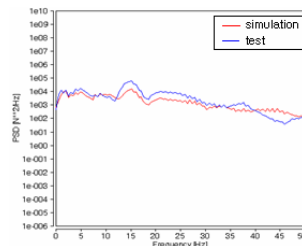


(c) Assist arm force

Fig. 10 PSD result at belgian road



(a) Spring force (b) Trailing arm force



(c) Assist arm force

Fig. 11 PSD result at impulse bar road

5. 결 론

본 연구에서는 대상차량의 다양한 노면조건에 따른 휠 하중을 이용하여 현가계, 조향계, 제동계 등의 주요 샤시 시스템을 포함한 차량 및 주요 부품의 동특성 및 진동 특성을 분석하기 위하여 VTL 해석 기반 차량동역학 모델을 개발하였다. 이를 위하여 스프링, 댐퍼, 부쉬는 별도의 특성시험을 통하여 실차의 동특성과 비선형성을 반영하였으며, 다양한 차량 특성 파라미터 및 부품별 특성 파라미터는

별도의 시험 및 해석을 통해 도출하여 전차량 모델 구성에 반영하였다.

전체 97자유도로 구성된 다물체 동역학 차량 모델을 바탕으로 본 연구에서는 기구정역학 해석 및 진동특성 해석을 수행하여 대상차량의 운동 및 진동특성을 해석하였다. 이를 위하여 대상차량의 주행하중 및 진동측정 시험을 수행하여 다양한 노면조건에 따른 휠 하중을 계측하고 이를 차량 모델에 입력하였다. 또한 차량 모델 동특성 해석 결과와 주행하중 및 진동측정 시험 결과를 시간역 및 주파수역에서의 응답을 비교분석하여 최종적으로 다물체 동역학 차량 모델의 해석 신뢰성을 확보하였다.

이와 같은 VTL 차량 모델은 향후 타이어와 도로노면을 포함한 VPG 차량 모델로 확장이 가능하여 다양한 차량 주행 특성, 진동소음 특성과 타이어 동특성 해석에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Min. S. K., 1999, Vehicle - Commerce at Light Speed, Moonwon Press.
- (2) ADI Technical Staff, 1995, "Real-time Seventeen-Degree-of-Freedom Motor Vehicle Simulation", ADI Technical Report.
- (3) 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.
- (4) Lee, C. H., Kim, S. S., Jeong, W. H., and Lee, S. H., 2006, "Development of Real Time Vehicle Dynamics Models for Intelligent Vehicle HILS", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.14, No.4, pp.199-206.
- (5) 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.
- (6) Baek, W. K., Yang, B. S., Lee, J. S., Kang, T. H., and Ryu, S. W., 2005, "1/4 Car Vibration Simulation Using an Empirical MR Damper Model", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.15, No.9, pp.1016-1022.
- (7) Kwon, S. J., Chun, J. H., Jang, S., and Suh, M. W., 2006, "Driving Performance Analysis of the Adaptive Cruise Controlled Vehicle with a Virtual Reality Simulation System", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.20, No.1, pp.29-41.