

< 응용 논문 >

첨단안전장치 검사 환경 구축을 위한 차량동역학 모델링 및 검증

김진용^{*1)} · 정창현¹⁾ · 정도현¹⁾ · 권영문²⁾ · 유찬학²⁾

한국자동차연구원 주행안전연구센터¹⁾ · 한국교통안전공단 첨단안전연구처²⁾

Modeling and Verification of Vehicle Dynamics for the Establishment of Advanced Safety Device Inspection Environment

Jinyong Kim^{*1)} · Changhyun Jeong¹⁾ · Dohyun Jung¹⁾ · Yeongmun Gwon²⁾ · Chanhak Yu²⁾

¹⁾Driving Safety R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾Advanced Safety Research Department, Korea Transportation Safety Authority, 288-7 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si, Gyeongbuk 39660, Korea
(Received 21 May 2021 / Revised 3 June 2021 / Accepted 7 June 2021)

Abstract : As the number of vehicles equipped with advanced safety devices increases, cases of malfunction and inoperability are rapidly reported. As a result, research is being conducted on the inspection of advanced safety devices through virtual driving environments, mainly by public institutions. Real-time vehicle dynamics models similar to due diligence are essential for virtual driving environments. In this paper, a real-time vehicle dynamics model was developed through parts and vehicle characteristics tests in order to establish an advanced safety device inspection environment, and correlation was verified by comparing to real vehicle characteristics tests. The real vehicle correlation of the vehicle dynamics model was 97 %, which was very similar to a real vehicle behavior.

Key words : Advanced safety devices(첨단안전장치), Vehicle dynamics model(차량동역학 모델), Vehicle inspection(자동차 검사), Characteristics tests(특성시험), Correlation verification(상관도 검증)

Nomenclature

l_f : distance from vehicle center of gravity to front wheel center, m
 l_r : distance from vehicle center of gravity to rear wheel center, m
 l : wheel Base, m
 W : vehicle total weight, kgf
 W_r : rear wheel axis weight, kgf
 I_{zz} : yaw inertia, kg-m²
 $\frac{dr}{dt}$: yaw angular acceleration, rad/s²
 Y_{fl}, Y_{fr} : front left, right lateral force, kgf
 Y_{rl}, Y_{rr} : rear left, right lateral force, kgf
 r^2 : coefficient of determination

r : coefficient of correlation
 \hat{y} : regression function of simulated data for test data
 \bar{y} : average of test data
 y : test data
 SSE : explained sum of squares
 SST : total sum of squares
 SSR : residual sum of squares

1. 서론

최근 AEB(Autonomous Emergency Braking System), LDWS(Lane Departure Warning System) 등 첨단안전장치가 의무장착으로 법제화¹⁾되면서 시장이 크게 성장하고 있다. 첨단안전장치 장착 차량이 증가되면서 오작동 및 작동 불가 사례가 급격하게 보고되고 있다. 이에 공공기

*Corresponding author, E-mail: kimjy@katech.re.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

관을 중심으로 첨단안전장치의 정기검사에 관련한 연구가 진행되고 있다.²⁾ 첨단안전장치 검사는 많은 차량을 짧은 시간에 수행해야 하기 때문에 주행시험장에서 실차시험을 하는 방법은 적용하기에는 어려움이 있어, 가상 주행공간에서 첨단안전장치 활성화 조건을 구현하여 정상 작동유무를 검사하는 방법이 연구되고 있다. 가상 주행환경을 개발하기 위해서는 실차와 유사한 실시간 차량동역학 모델 개발이 필수적이다.

차량동역학 모델을 개발하는 방법으로 이중렬 등³⁾은 2자유도 모델을 제시하였고, 김상섭과 정홍규⁴⁾는 현가장치 함수모델을 사용하였으며, 이창호 등⁵⁾은 부분시스템 합성법에 의한 다물체 차량동역학 모델을 제안하였고, 김현일 등⁶⁾은 차량동역학 모델을 개발하기 위해 SPMD 장비를 통해 Kinematics & Compliance 데이터를 산출하는 방법을 제시하고 있으나 기존 연구에서는 실차시험과의 상관성을 확보하는데 어려움이 나타나고 있다.

본 논문에서는 첨단안전장치 검사 환경 구축을 위하여 단품 및 차량 특성시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 실시간 차량동역학 모델을 개발하였고, 실차 동특성 시험과 비교하여 상관도를 검증하였다.

2. 차량동역학 모델링

2.1 제원분석

본연구의 대상차량인 국내 H사 준대형 승용차에 대하여 Table 1과 같이 기본 제원을 조사하였다. 기본 제원을 통해 축거, 윤거, 엔진 최고 출력 등의 정보를 얻을 수 있다. 추가적으로 제조사의 정비지침서를 이용하면 변속기의 기어비, 중감속비 및 토우, 캠버, 캐스터 등 휠 얼라이먼트 설정값을 분석할 수 있다.

Table 1 Vehicle specification

| Item | Contents |
|-----------------------------------|--------------|
| Overall length (mm) | 4,990 |
| Overall width (mm) | 1,875 |
| Overall height (mm) | 1,470 |
| Wheel base (mm) | 2,885 |
| Front tread (mm) | 1,612 |
| Rear tread (mm) | 1,620 |
| Engine type | 2.5 Gasoline |
| Displacement volume (cc) | 2,497 |
| Maximum power (ps/rpm) | 198/6100 |
| Maximum torque (kg *m/rpm) | 25.3/4000 |
| Complete vehicle curb weight (kg) | 1,625 |
| Drive method | Front drive |
| Front suspension | Macpherson |
| Rear suspension | Multilink |

2.2 단품 특성 시험

대상차량의 현가시스템의 주요단품으로 스프링, 댐퍼 부시를 선정하고 특성 시험을 통해 데이터를 확보하였다. 스프링은 Photo. 1과 같이 리니어 액츄에이터를 이용하여 준정적 하중을 가하고 축방향 변위를 측정하며, 변위-하중 선도의 선형 기울기를 계산하여 스프링 강성을 산출하였다. 댐퍼는 Photo. 2와 같이 댐퍼 시험기를 이용하여 Sweep으로 축방향 변위를 가하고 댐퍼 로드에서 작용하는 하중을 측정하여, 속도-하중 비선형 선도를 산출하였다. 부시는 Photo. 3과 같이 부시 시험기를 이용하여 로우안 전후, 트레일링 압 등 주요 부시에 대하여 병진방향, 회전방향의 강성을 산출하였다.



Photo. 1 Spring characteristic test

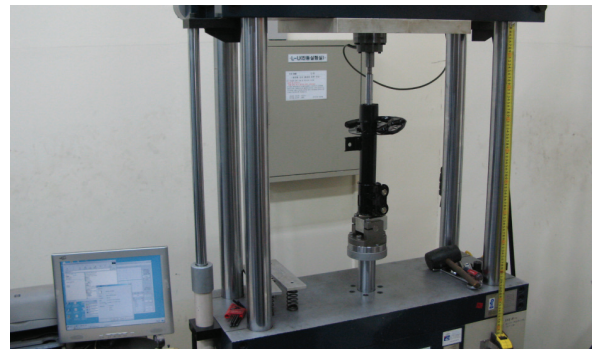


Photo. 2 Damper characteristic test

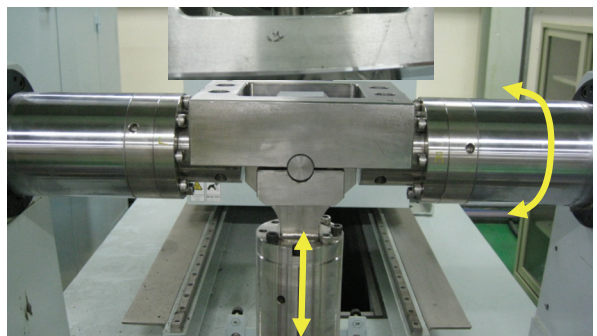


Photo. 3 Bush characteristic test

2.3 Hard Point 측정

현가시스템의 다물체 동역학 모델링을 위해 Photo. 4와 같이 FARO 장비를 이용하여 Hard point를 측정하였다. 공차상태에서 차량을 4주식 리프트에 세팅하고 표준 볼을 사용하여 캘리브레이션을 한 후 로우암등 전후륜의 주요 현가 부품의 고정 위치를 계측하였다.



Photo. 4 Hard point measurement

2.4 Kinematics & Compliance 해석

주요 현가부품의 Hard point, 스프링, 댐퍼, 부쉬 특성 데이터를 이용하여 전후륜에 대한 다물체 동역학모델을 Fig. 1과 같이 구성하고 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 캠버, 캐스터, 횡방향 거동에 대한 Kinematics와 Compliance 특성을 해석하였다.

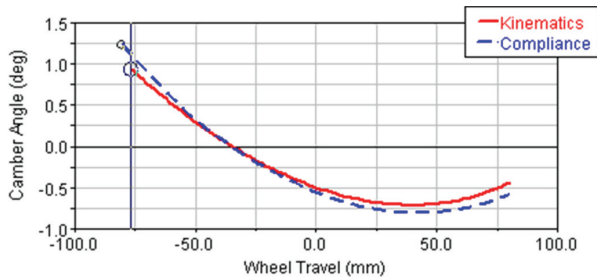
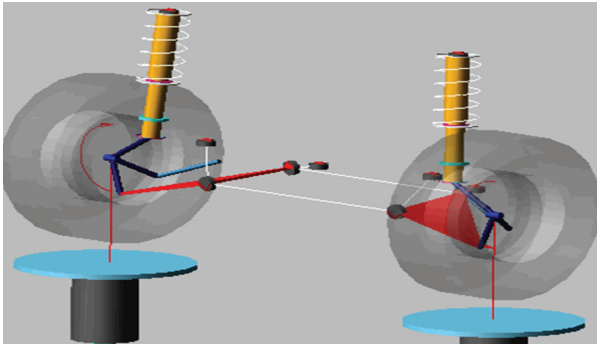


Fig. 1 Kinematics & compliance analysis

2.5 차량 특성 시험

차량의 무게를 측정하기 위해 Photo. 5와 같이 각 바퀴에 하중센서를 설치하였다. 전후륜에서 측정된 하중 데이터와 식 (1)을 이용하여 차량의 무게중심 위치를 계산하였다. 각 휠에 6방향 하중을 측정할 수 있는 휠 하중 센서를 장착하여 선회시 휠의 횡방향 하중과 차량 요율을 측정하고 미분하여 식 (2)에서 요 운동에 대한 관성을 산출하였다. 다양한 실차 주행을 하면서 OBD2 단자를 통해 수집한 스로틀 각, 엔진토크, 엔진회전속도 정보를 이용하여 Fig. 2와 같은 엔진맵을 모델링하였고, 기어단수, 스로틀각, 변속기 출력단 회전속도를 이용하여 Fig. 3과 같이 변속맵을 모델링하였다. 조향휠의 각도와 타이어 휠의 각도관계를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 턴테이블을 설치하여 조향각센서에서 신호를 받아 60도씩 조향휠을 움직이면서 타이어휠의 각도를 측정하였다. 제동시 휠 하중센서에서 측정된 브레이크 토크와 휠 제동 유압을 측정하여 Fig. 5와 같이 제동압력에 따른 토크 특성을 분석하였다.

$$l_f = \frac{W}{l} W_r \quad , \quad l_r = l - l_f \quad (1)$$

$$I_{zz} \frac{dr}{dt} = l_f(Y_{fl} + Y_{fr}) - l_r(Y_{rl} + Y_{rr}) \quad (2)$$



Photo. 5 Vehicle weight measurement

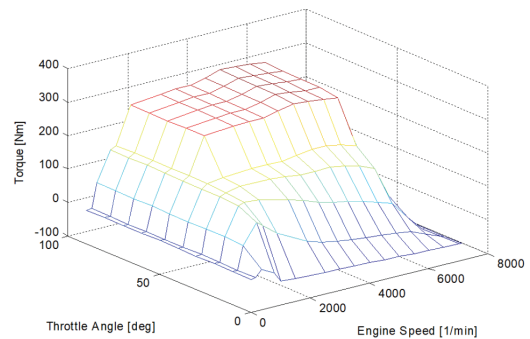


Fig. 2 Engine map

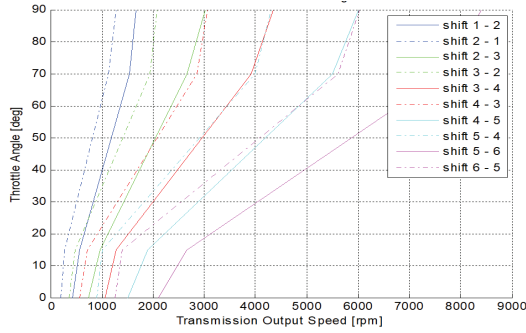


Fig. 3 Shift map

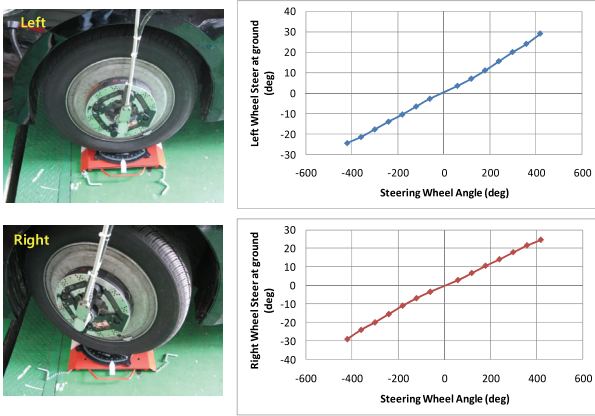


Fig. 4 Wheel steer measurement

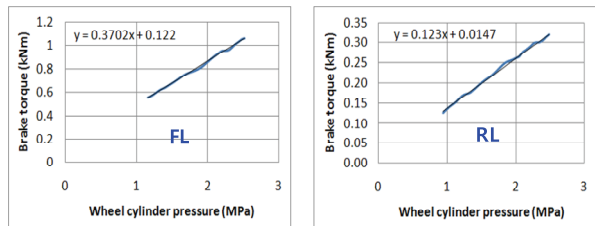


Fig. 5 Brake characteristic test

2.6 전차량 모델링

상기 차량제원분석, 현가시스템 단품특성시험, Hard point 측정 및 Kinematics & Compliance 해석, 차량 특성 시험을 통해 분석한 데이터를 이용하여 Fig. 6과 같은 전



Fig. 6 Full vehicle modeling

차량 모델을 개발하였다. 타이어모델은 국내 H사로부터 제공받은 Magic-Formula 모델을 사용하였다. 전차량 모델링 도구로는 실시간 연산이 가능한 27 자유도의 CarSim 프로그램을 사용하였다.

3. 실차 동특성 시험

3.1 종방향 실차시험

종방향 실차 동특성을 측정하기 위해 가속시험과 감속시험을 수행하였다. Fig. 7과 같이 가속시험에서는 주행시험장에서 스로틀 위치센서(TPS)가 10%, 100% 일 때 차량의 주행속도 데이터를 수집하였고, Fig. 8과 같이 감속시험에서는 감속도 0.3g, 0.5g가 되도록 제동유압을 형성하여 차량의 제동속도 데이터를 수집하였다. 스로틀 위치, 제동유압, 차량속도 데이터는 실차 CAN통신을 통해 수집하였다.

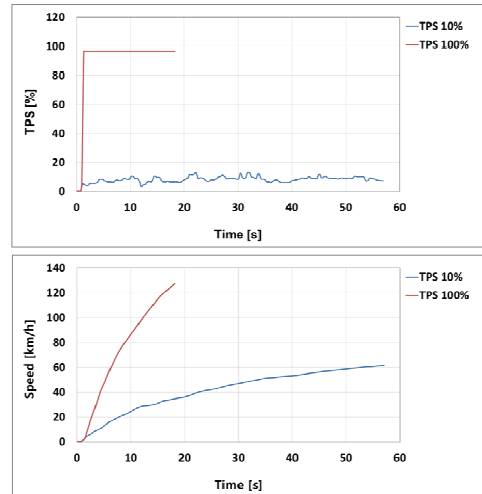


Fig. 7 Acceleration test

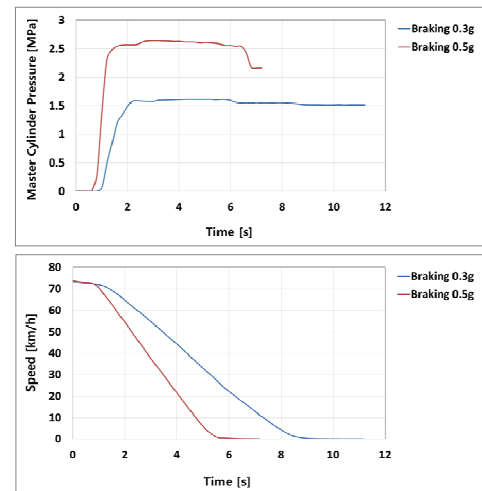


Fig. 8 Deceleration test

3.2 횡방향 실차시험

횡방향 실차 동특성을 측정하기 위해 스텝 조향시험 (J-turn) 및 이중 차선변경 시험(Double lane change)을 수행하였다. 스텝 조향시험은 ISO 7401 기준에 따라 80 km/h 주행중 횡방향으로 4 m/s²이 되도록 조향하여 Fig. 9 와 같이 조향입력에 대한 요율 및 횡가속도 특성 데이터를 수집하였다. 이중 차선변경 시험은 ISO 3888 기준에 따라 주행차선을 설정하고 80 km/h 주행으로 설정 차선을 벗어나지 않도록 조향하여 Fig. 10과 같이 실차 CAN 통신을 통해 조향입력에 대한 요율 및 횡가속도 특성 데이터를 수집하였다.

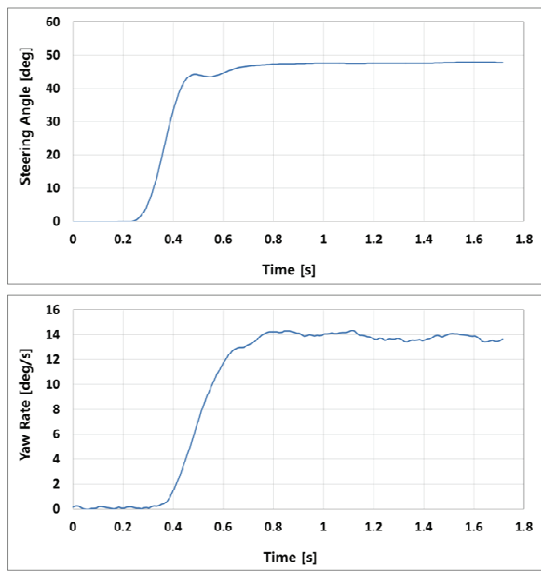


Fig. 9 J-turn test

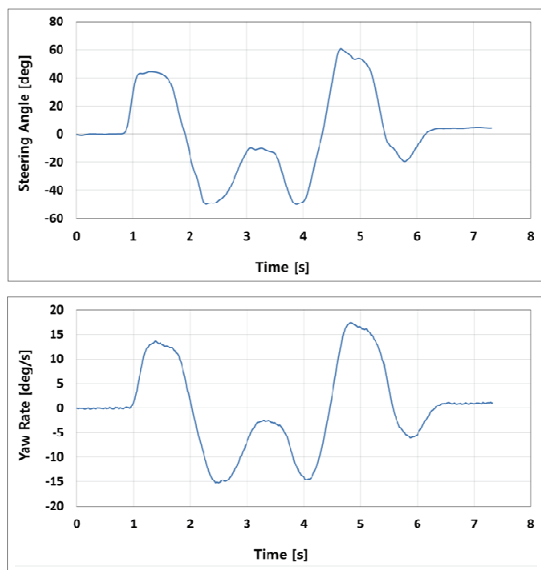


Fig. 10 Double lane change test

4. 차량동역학 모델 검증

2장에서 제시한 차량동역학 모델에 3장의 실차시험 조건을 입력하여 얻은 시뮬레이션 데이터와 실차시험에서 측정된 종횡방향 동특성결과를 비교 분석하였다. Figs. 11~14와 같이 가속/감속시 속도데이터 및 스텝 조향/이중 차선변경시 요율과 횡가속도 데이터에서 시뮬레이션과 실차시험이 매우 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 식 (3)을 이용한 결정계수(r^2) 및 상

Table 2 Correlation analysis

| Test mode | Target variable | Correlation (%) | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|
| | | r^2 | r |
| Acceleration test | Vehicle speed (TPS 10 %) | 99.80 | 99.90 |
| | Vehicle speed (TPS 100 %) | 99.00 | 99.50 |
| Deceleration test | Vehicle speed (Braking -0.3 g) | 99.90 | 99.95 |
| | Vehicle speed (Braking -0.5 g) | 99.81 | 99.91 |
| J-turn test | Yaw rate | 98.52 | 99.26 |
| | Lateral acceleration | 94.25 | 97.08 |
| Double lane change test | Yaw rate | 99.59 | 99.79 |
| | Lateral acceleration | 96.60 | 98.28 |

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (3)$$

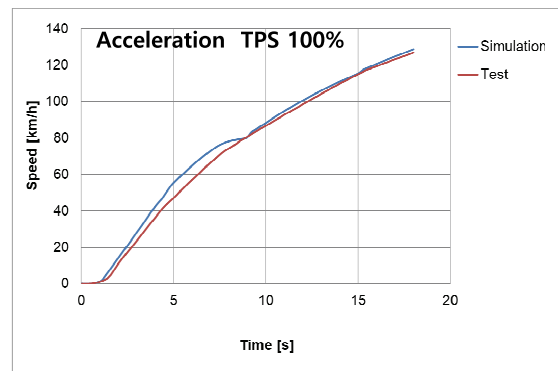
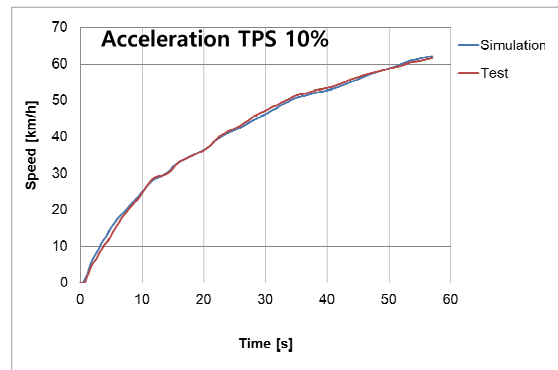


Fig. 11 Acceleration verification

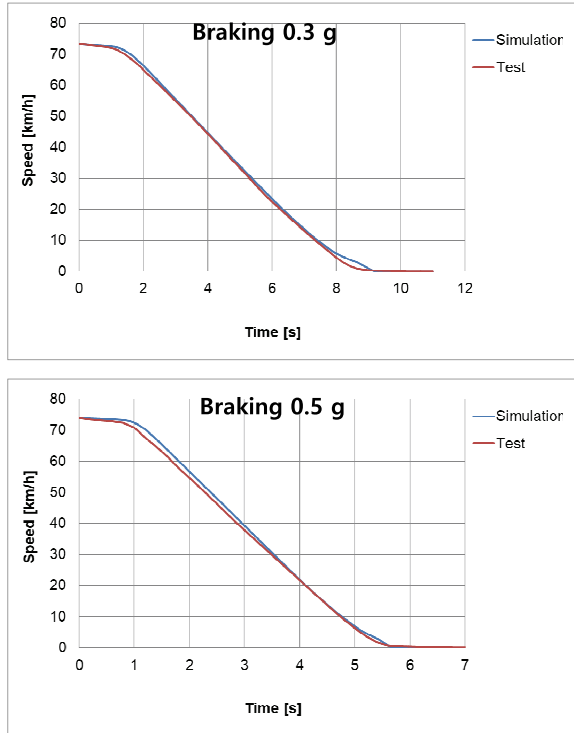


Fig. 12 Deceleration verification

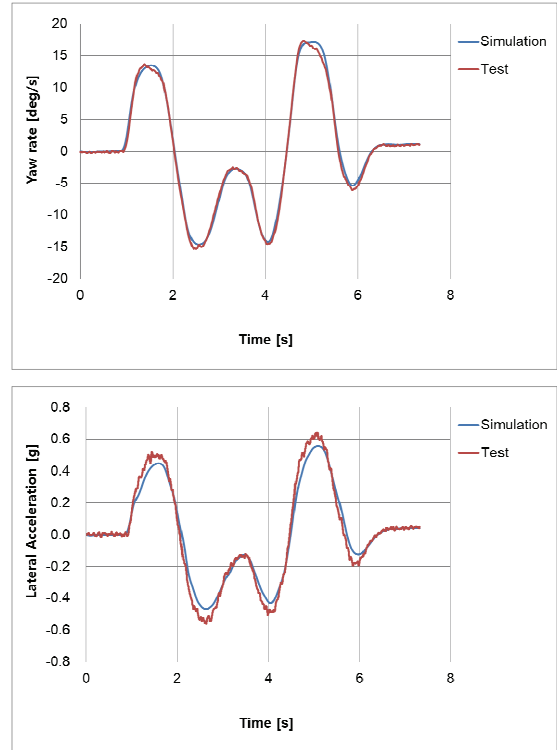


Fig. 14 Double lane change verification

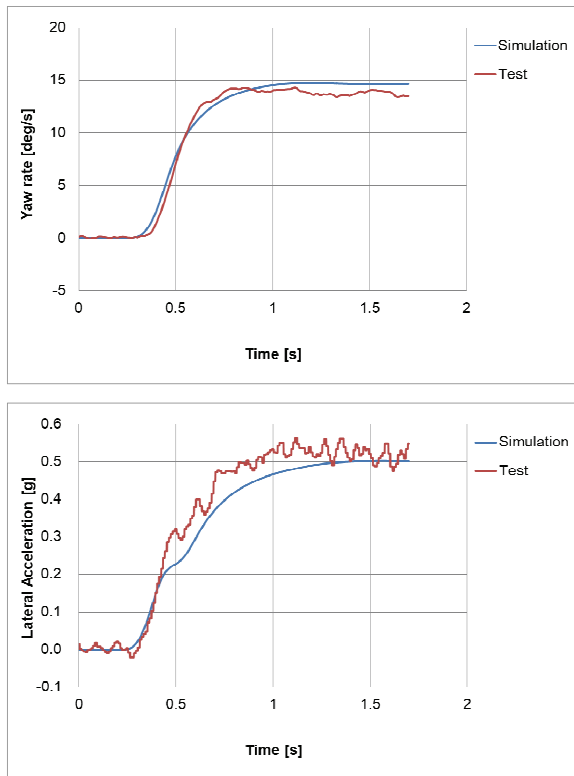


Fig. 13 J-turn verification

관계수(r)를 분석한 결과 Table 2와 같이 본 연구에 의해 개발한 차량동역학 모델은 97 % 이상의 실차상관도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 식 (3)의 회귀모델은 기울기가 1이며, 절편이 0인 모델을 사용하여 일치성을 확인할 수 있도록 설정하였다.

5. 결론

본 연구를 통해 단품 및 차량 특성시험을 기반으로 실시간 차량동역학 모델을 개발하였다. 헨가시스템 주요 단품으로 스프링, 댐퍼, 부시에 대한 특성을 시험을 통해 도출하고, 차량시험을 통해 Hard point, 차량무게, 횡관성, 엔진맵, 변속맵, 조향, 브레이크 특성을 산출하였다. 수집된 데이터를 분석하여 실시간 연산이 가능한 CarSim 도구를 이용한 차량동역학 모델을 개발하고 중형방향 실차시험 입력으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션과 실차 동특성시험 데이터를 비교분석한 결과 실차상관도가 97 %로 확인되었다. 검증된 실시간 차량동역학 모델은 첨단안전장치가 장착된 차량의 가상 성능검사 환경개발에 활용될 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통 연구개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : 21SDPT-C158092-02).

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules Concerning the Performance and Standards of Motor Vehicles and Auto Parts, <https://www.law.go.kr>, 2021.
- 2) U. S. Weo, Y. M. Gwon, H. J. Kim, E. S. Kim, I. H. Ryu and B. D. Kang, "A Study on the Inspection Standards and Inspection Methods for Advanced Driver Assistance Systems on In-use Vehicle," KSAE Spring Conference Proceedings, p.1014, 2019.
- 3) J. R. Lee, J. K. Lee and T. Ohta, "Development of a Vehicle Dynamics Model for Lane Keeping Control," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.659-664, 2004.
- 4) S. S. Kim and H. K. Jung, "Vehicle Dynamics Modeling and Correlation Using the Kinematic and Compliance Test of the Suspension," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.109-118, 2005.
- 5) C. H. Lee, S. S. Kim, W. H. Jeong and S. H. Lee, "Development of Real Time Vehicle Dynamics Models for Intelligent Vehicle HILS," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.199-206, 2006.
- 6) H. I. Kim, H. W. Jung, B. O. Jin, J. H. Jo, J. H. Lee and T. H. Lee, "A Study on the Development and Correlation of Full Vehicle Model for Virtual Vehicle Dynamics Simulation Using CarMaker," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.363-368, 2020.