

실험기반 차량모델을 이용한 실시간 차량동역학 해석

유완석^{*†} · 나상도^{*} · 김광석^{**}

* 부산대학교 기계공학부, ** 인하공업전문대학 자동차과

Real-Time Dynamic Analysis of Vehicle with Experimental Vehicle Model

Wan Suk Yoo^{*†}, Sang Do Na^{*} and Kwang Suk Kim^{**}

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Dept. of Automotive Engineering, Inha Technical College

(Received May 24, 2012 ; Revised July 7, 2012 ; Accepted July 10, 2012)

Key Words: Experimental Vehicle Model(실험적 차량모델), Real-Time(실시간), Dynamic Analysis(동역학 해석)

초록: 실시간 차량동역학 해석을 위해서는 효율적인 차량 모델이 필요하게 된다. 효율성을 높이기 위해 집중질량모델로 가정하면 현가장치의 특성을 고려하기 어렵게 되며, 현가장치의 특성을 모두 고려한 다물체동역학 모델에서는 효율성이 떨어진다. 그러므로 본 논문에서는 다물체동역학 모델링을 사용하되 해석의 효율성을 저하시키는 현가장치의 각종 요소들의 효과는 기구정역학 실험으로 추출된 특성그래프로 대체함으로써 효율성도 기하고자 시도하였다. 6x6 차량을 차체와 휠로 구성된 차량으로 모델을 정의하였고, 다물체동역학 모델인 ADAMS 결과와 비교하여 실험적 모델의 유용성을 검증하였다. 그리고 검증된 실험적 차량모델을 RT-LAB 을 활용한 실시간 시뮬레이션 환경에 삽입하여, 실시간성 시뮬레이션의 가능성을 검증하였다.

Abstract: The paper presents an Experimental Vehicle Model (EVM), that utilizes the kinematic characteristics of suspensions from SPMD test data. The relative displacement and orientation of a wheel with respect to the body are represented as a function of the vertical displacement of the wheel. The equations of motion of the vehicle are formulated in terms of local coordinates that do not require coordinate transformation, which improves the efficiency of dynamic analysis. The EOM was modularized for each suspension model, and a 6×6 vehicle model was obtained by combining six suspensions. The analysis results were compared with ADAMS to verify the accuracy of the EVM. This study also verifies the feasibility of real-time simulation with the developed EVM. For a vehicle simulation for 1 ms, the real simulation time required within 20% of the prescribed time. This result shows that the EVM meets the real-time simulation requirements.

1. 서 론

차량동역학 시뮬레이션 기술의 발전은 차량개발 과정에서 실험 횟수를 급격히 줄여주었으며, 향후에는 실차 실험 없이 차량개발 과정을 마무리하려는 방향으로 발전하고 있다. 또한, 무인 자율차량의 해석에서는 각종 센서에서 들어오는 신호를 동역학 해석의 입력으로 받아들이고, 차량동역학 해석에서 나온 결과를 모터 등 각 부품에 전달하기

위해 차량동역학에 소요되는 시간은 실시간(real-time)의 20% 선에서 해결하는 것을 원하고 있다.

실시간 차량동역학 시뮬레이션을 위해서는 간단한 차량모델의 확보가 필수적이다. 많은 경우 차량을 여러 개의 질점(particle)과 강체(particle)로 이루어진 집중질량모델(lumped parameter model)을 사용하고 있으나, 이런 단순화된 모델로는 차량의 현가장치에서 나오는 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 차량 현가장치에서 나오는 특성을 모두 반영하기 위해 다물체동역학 모델(multibody model)을 사용하면 시뮬레이션의 정확성은 높아지나, 해석 시간이 길어져 실시간성을 확보하기 위해 보다 고성능의 컴퓨터가 필요하게 된다.

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

본 논문에서는 집중질량모델과 다물체동역학 모델의 이점을 동시에 살릴 수 있는 실험적 차량모델을 제안하고, 이를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였을 경우, 해의 정확성과 실시간 가능성을 비교해 보고자 한다. 실험적 차량모델(EVM, experimental vehicle model)이란 현가장치 등 차량의 특성 자료를 여러 가지 실험에서 구한 뒤 이를 사용하여 차량동역학 모델을 구성하는 것을 말한다.^(1,2)

해석에 사용될 차량의 현가특성은 SPMD (suspension parameter measuring device)를 사용하여 구할 수 있으며, 차량모델에 들어간 타이어의 자료도 타이어 특성을 측정할 수 있는 실험장치로부터 추출할 수 있다.

본 연구에서는 SPMD 에서 나온 차량의 현가장치 특성을 차량모델에 넣은 방법으로 실험적 차량모델을 구성한 뒤, 실시간 시뮬레이션 가능성을 확인하였다. 차량동역학의 실제 시뮬레이션 시간은 실제 시간의 20% 이내에서 마칠 수 있음을 확인하였다.

2. 차량동역학 모델

2.1 다물체 동역학 차량 모델

다물체동역학 차량모델(multibody vehicle model)이란 차량을 구성하는 여러 부품들(parts)이 여러 종류의 조인트들(joints)로 연결된 모양을 실제 차량의 경우와 같도록 모델링하는 방법이다. 따라서, 상당히 정확한 차량모델을 만들 수 있다는 이점이 있는 반면, 컴퓨터 시뮬레이션 시간이 길어지고, 완성차 업계에서 자료를 제공하지 않을 경우 차량모델을 만들기가 쉽지 않게 된다. Fig. 1 에는 다물체동역학 차량모델의 한 예를 보여주고 있으며, 보다 정확한 차량의 모델링을 위해서는 부싱 등 컴플라이언스 요소들의 정확한 모델링도 연구되고 있다.⁽³⁾

2.2 집중 질량 차량 모델

집중질량 차량모델(lumped parameter vehicle model)이란 차량에서 차체 및 바퀴 등 주요한 물체들에 질량이 집중되어 있다고 생각하고, 몇 개의 주요한 물체들 만으로 모델링 하는 것을 의미한다.⁽⁴⁾ 이러한 차량모델링에서는 물체의 수가 적어지며, 자유도 또한 적어서 시뮬레이션에서 효율성을 얻을 수 있다. 그러나, 현가장치(suspension) 구성품들이 차량모델링에 들어가지 않으므로, 현가장치의 특성을 고려할 수가 없다. Fig. 2 는 집중질량 차량모델의 한 예를 보여주고 있다.

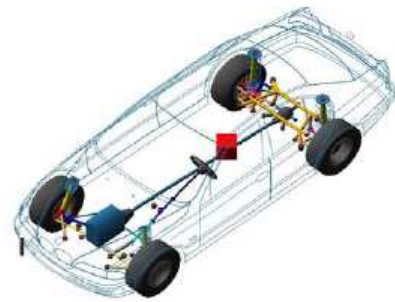


Fig. 1 Multibody vehicle model

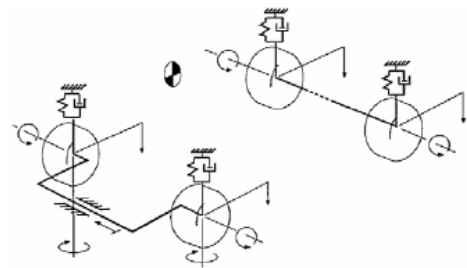


Fig. 2 Lumped parameter vehicle model

2.3 실험적 차량 모델

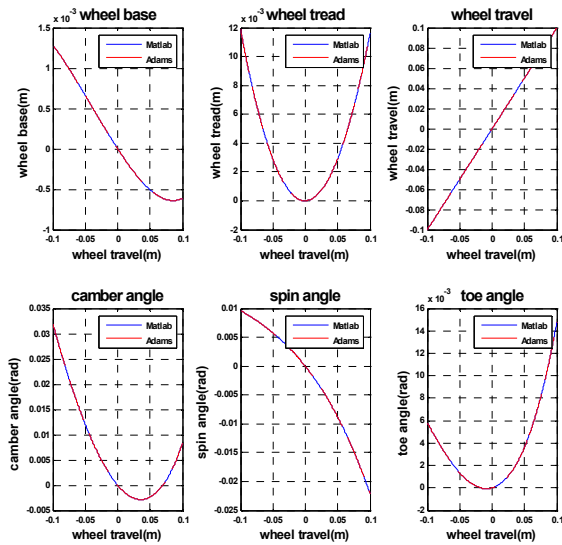
실험기반 차량모델(experimental vehicle model)이란 현가장치 또는 타이어에서 차량에 작용하는 힘과 변위와의 관계 등을 측정하고, 그 자료를 바탕으로 차량동역학 해석이 이루어지도록 차량동역학 모델을 만드는 것을 의미한다.

예를 들면, 차량의 현가장치가 달린 상태로 차체만 고정시킨 뒤 바퀴를 아래 위로 움직이면서, 바퀴의 움직임 및 작용하는 힘에 따른 현가장치의 상대변위를 측정된 뒤, 이를 바탕으로 차량동역학 모델을 구성하게 된다.

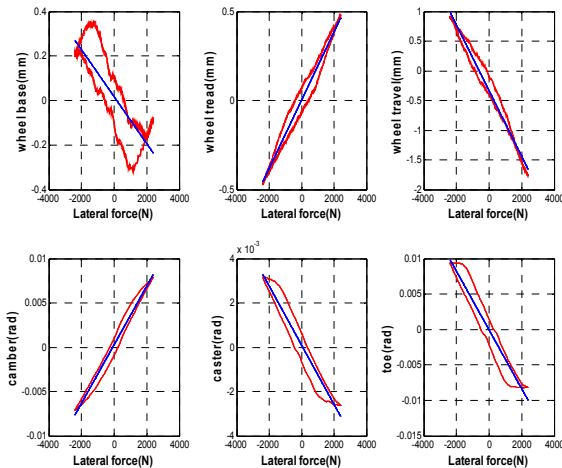
Fig. 3 에는 차량에서 측정된 현가장치 특성을 나타낸 예를 보여주고 있다. 바퀴의 움직임에 따른 윤거(wheel base), 캠버각(camber angle), 토각(toe angle) 등의 변화를 보여주는 그래프 이다. 실험적 차량모델에서는 차량동역학 모델링 과정에서 이 그래프에 나타난 데이터를 바로 읽을 수 있도록 만들어 준다.

2.4 타이어 모델

차량동역학 해석을 위해 사용된 타이어 모델은 MF(magic formula) 타이어 모델⁽⁵⁾을 사용하였다. MF 타이어 모델에서는 타이어에서 발생하는 힘과



(a) Suspension characteristics versus wheel travel



(b) Suspension characteristics versus tire force

Fig. 3 Example of suspension characteristics

모멘트를 식 (1)과 같은 형태의 수식으로 가정 한 뒤, 실험값에 근접하도록 여러 개수들을 조정하여 Fig. 4 와 같은 그래프로 만들게 된다.

$$y = D \sin[C \arctan\{Bx - E(Bx - \arctan Bx)\}] \quad (1)$$

여기서, B는 stiffness factor로 0인 지점에서의 기울기를 결정하며, C는 shape factor로 그래프의 형상을 결정하며, D는 peak factor로 그래프의 최고치를 결정한다. 그리고 E는 curvature factor로 peak치에서 변곡되는 정도를 결정해주는 요소이다.

3. 차량의 운동방정식

3.1 차량의 좌표계

실험적 차량모델에서 휠의 변위에 따른 현가장

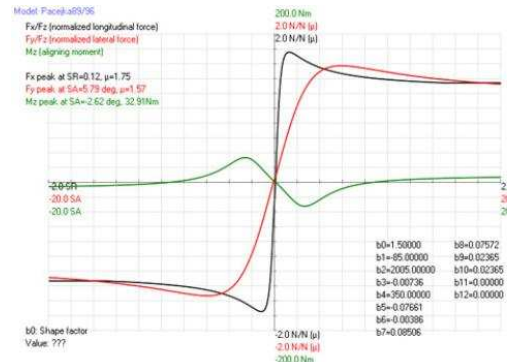


Fig. 4 Example of MF tire model

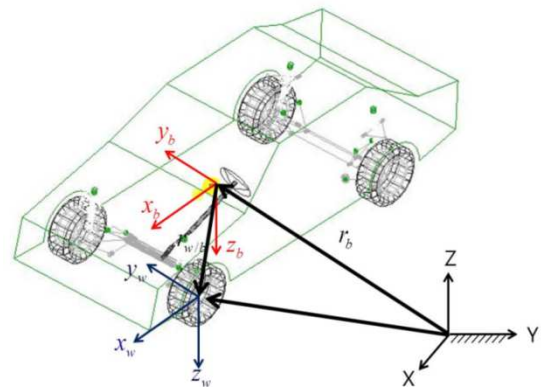


Fig. 5 Coordinate system

치의 특성이 측정되므로, 차량의 운동방정식을 구성하기 위한 위치, 속도, 및 가속도를 정의하기 위하여 Fig. 5 와 같은 좌표계를 정의한다.

그림에서 (XYZ), (x_b, y_b, z_b) , (x_w, y_w, z_w) 좌표계는 각각 관성좌표계, 차체고정 좌표계, 바퀴고정 좌표계 이다.

3.2 차량의 기구학

실험적 차량모델에서 휠의 변위에 따른 현가장치의 특성이 측정되므로, 차량이 운동방정식을 구성하기 위한 위치, 속도, 및 가속도를 다음과 같이 정의한다.

차량의 위치 관계식은 식 (2)와 같이 기술된다.

$$\Phi(y_b'', y_{w/b}'') = 0 \quad (2)$$

여기서, $y_b'', y_{w/b}''$ 는 각각 차체, 차체와 휠 사이의 상대 위치를 나타내는 벡터로써 차체고정 좌표계에서 정의된 벡터이다.

식 (2)를 시간에 미분하여 식 (3)의 속도 관계식을 얻게 된다.

$$\dot{\Phi} = \Phi_{y_b''} \cdot \dot{y}_b'' + \Phi_{y_{w/b}''} \dot{y}_{w/b}'' \quad (3)$$

여기서 자코비안행렬(Jacobian matrix) $\Phi_{y_b''}$, $\Phi_{y_{w/b}''}$ 는 각각 차체와 차량과 휠의 상대변위에 대한 자코비안으로, 차체에 대한 자코비안은 0 이 된다. 따라서 차체에 대한 휠의 상대 좌표를 일반 좌표로 할 경우, 속도 관계식은 차체에 대한 휠의 상대 속도 벡터 $\dot{y}_{w/b}''$ 의 식으로 표현된다. 또한, 차량은 휠의 수직변위에 지배적이므로 미분된 구속식인 식 (3)과 차체에 대한 휠의 수직 성분을 포함하여 차체에 대한 휠의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{y_{w/b}''} \\ C \end{bmatrix} \dot{y}_{w/b}'' = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\delta}_w'' \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $C = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이며, $\dot{\delta}_w''$ 는 차체에 대한 휠의 수직 방향 상대 속도이다.

이에 속도 관계식을 나타내면 식 (5)와 같이 표현된다. 식 (5)를 미분하여 식 (6)의 가속도 관계식을 얻게 된다.

$$\dot{y}_{w/b}'' = \begin{bmatrix} \Phi_{y_{w/b}''} \\ C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\delta}_w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{d(6 \times 5)} & R_{l(6 \times 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\delta}_w'' \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= R_l \cdot \dot{\delta}_w''$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{w/b}'' &= R_l \cdot \ddot{\delta}_w'' + \dot{R}_l \cdot \dot{\delta}_w'' \\ &= R_l \cdot \ddot{\delta}_w'' + \frac{\partial R_l}{\partial \delta_w''} \cdot \frac{\partial \delta_w''}{\partial t} \cdot \dot{\delta}_w'' \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)에서 볼 수 있듯이 R_l 은 차체에 대한 휠의 상대운동 $y_{w/b}''$ 과 휠의 수직방향 속도 $\dot{\delta}_w''$ 의 관계로 현가장치의 기구학적 특성을 정의하여 적용할 수 있다. 그러므로 SPMD 데이터로부터 R_l 를 정의할 수 있고 해석에 있어 효율적으로 각 물체의 상태를 표현할 수 있다.

3.3 차량의 운동방정식

차량 해석의 전반적인 흐름도는 Fig. 6 과 같다. 단계 ①에서는 차량의 기본 체원과 해석을 위한 상태 변수에 초기 정보를 정의한다. 단계 ②에서는 정의된 위치 정보로부터 현가장치 및 조향장치

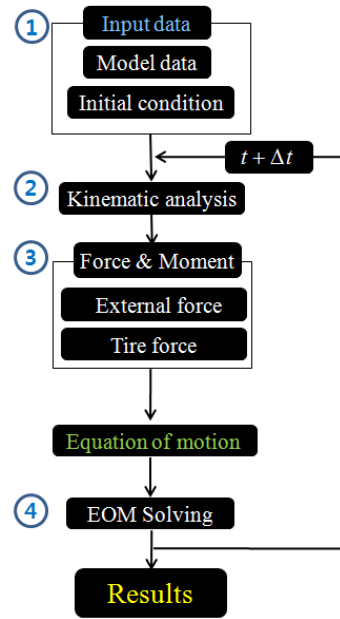


Fig. 6 Flow chart of the vehicle dynamic program

의 기구학적 해석 결과를 받아들여 속도, 가속도 해석을 통하여 차량 모델의 R_l , \dot{R}_l 를 계산한다. 단계 ③에서는 차량의 중력, 관성력 및 모멘트, 서스펜션 및 타이어에 작용하는 힘과 모멘트를 나타낸다. 그리고 단계 ④에서는 차량의 운동방정식을 정의하고, 수치해석 기법을 이용하여 운동방정식을 풀이한다.

차량동역학 해석 시간을 단축하기 위해서는 기호연산기법을 활용하여 운동방정식 전체를 기호연산식으로 바꾸는 방법도 해석시간을 줄이는데 기여할 수 있다.⁽⁶⁾

4. 차량 동역학 모델 검증

본 논문에서 만들어진 실험적 타이어 모델의 정확성을 비교하기 위하여 다물체동역학 모델인 ADAMS 모델과 비교하였다. 바퀴 6 개가 각각 독립적으로 움직이는 차량이 단순장애물을 넘어가는 Fig. 7 과 같은 차량동역학 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 8 에는 단순 장애물 통과시 샤시의 수직위치, 수직속도 및 수직가속도를 보여주고 있다. Fig. 7 에 나타난 바와 같이 실험적차량 모델을 이용한 결과가 다물체동역학 모델을 이용한 결과와 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

그리고 Table 1 은 10 초간의 bump 통과 시뮬레

Table 1 Comparison of CPU time between ADAMS and EVM model

시뮬레이션 환경	연산시간
ADAMS	52 sec
EVM(C/C++)	1.7024 sec

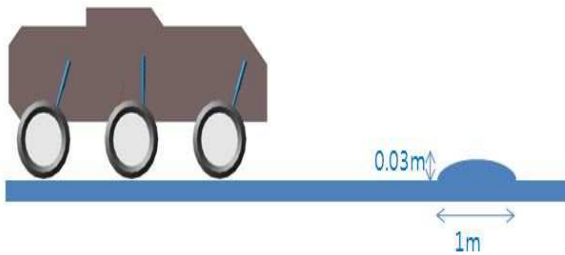


Fig. 7 Vehicle with 6 independent wheels

이전에 대한 ADAMS 와 EVM 모델의 CPU 시간을 비교한 것이며, EVM 모델이 실시간에 적합한 모델임을 알 수가 있다.

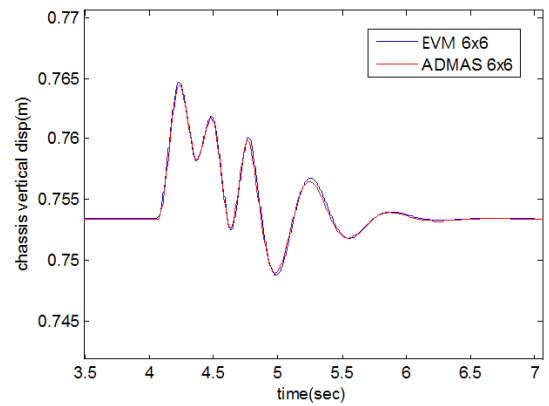
5. 실시간 시뮬레이션

5.1 실시간 시뮬레이션 시스템 구성

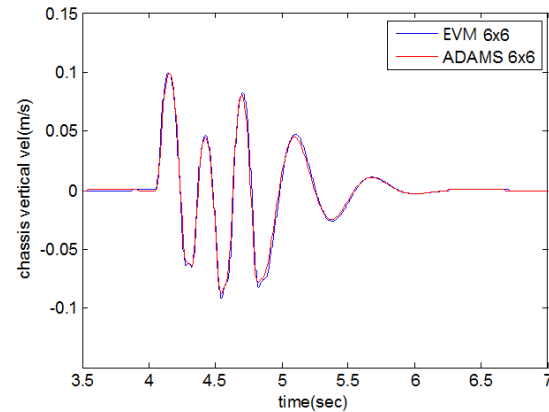
실시간 가능성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 실시간 시뮬레이션을 위한 RT-LAB 프로그램을 사용하였다. RT-LAB 은 Fig.9 와 같이 host PC 와 target PC 로 구성되어 있는데, host PC 는 모델 시뮬레이션에 관한 작업을 관리하며 target PC 와의 연동 및 해석 결과를 모니터링 하게 된다. 또한, target PC 에서는 모델링과 해석이 이루어지게 된다.^(7,8)

5.2 실시간 가능성 검증

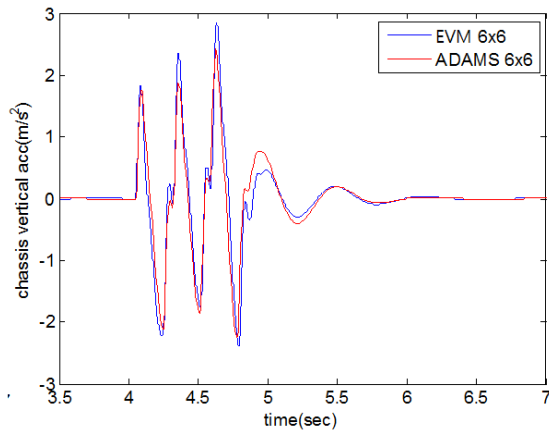
실시간 해석은 여러 공학 분야에서 사용되고 있으며 그에 따라 시뮬레이션 시간 간격도 다양하다. 실시간 해석에서는 계산 시간의 효율성을 위하여 가장 간단한 적분기를 사용한다. 이때, 1000us 이하의 적분 간격으로 해석하게 된다면 해석의 정확성이 떨어지므로 본 연구에서는 그 값을 1000 μs 로 정하였으며, 차량 동역학 해석에 필요한 순수 계산 시간은 20 % 인 200 μs 이내로 제한하였다. 실시간 해석을 하기 위해선 무엇보다도 빠른 연산이 이루어져야 한다. 그리고 주어진 시간 내에 계산을 마친 후 다음 step 으로 넘어가야 한다.



(a) Vertical position over a bump



(b) Vertical velocity over a bump



(c) Vertical acceleration over a bump

Fig. 8 Comparison of vehicle models

Fig. 7 에서 일정한 속도로 차량이 범프 통과하는 것을 실시간 시뮬레이션에 적용하였다. Fig. 10 에서와 같이 차량동역학 해석을 위한 컴퓨터 계산 시간은 초기 20%로 제한했던 사항과 거의 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 나머지 80% 정도의 유휴시간은 대기시간, 네트워크간 전송시간 등으로 사용된다. 이에 본 논문에 제시

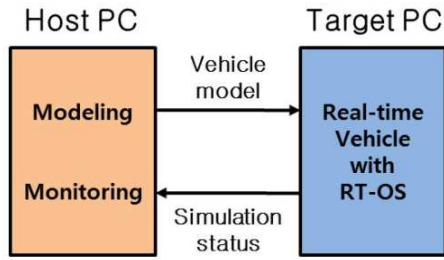


Fig. 9 Environment for real time simulation

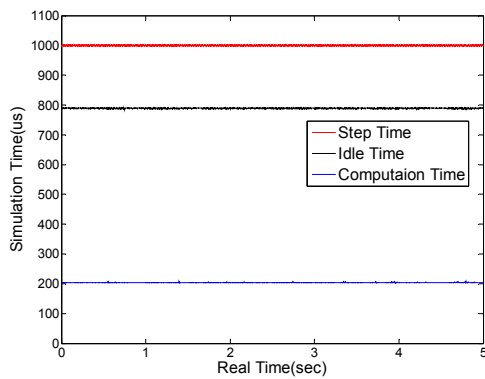


Fig. 10 Computation time in real time simulation

한 차량 모델이 실시간성에 적합하다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 현가장치의 실험결과를 차량동역학 해석에 적용할 수 있는 실험적 차량모델을 만들고, 다물체동역학 모델과 비교하여 신뢰성을 확인하였다. 또한, 개발된 실험적 차량모델이 실시간 해석에 적용될 수 있는지를 RT-LAB 환경에서 검증하였다. 해석결과 차량동역학 해석 시간이 실시간의 20% 이내로 소요되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 실시한 차량 시뮬레이션에는 운전자 모델이 포함되어 있는 점을 고려하여 본 차량동역학 모델이 추후 HILS(hardware in the loop

simulation)에 적합할 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

참고문헌

- (1) Jung, H.K., 2004, "Vehicle Dynamics Analysis and Chassis Design Using the Functional Suspension Model," Ph.D thesis, Kookmin University.
- (2) Jung, H.K. and Kim, S.S., 2004, "Development of an Efficient Vehicle Dynamics Model Using Massless Link of a Suspension," Vol.13 No.1, KSAE, pp 99~108.
- (3) Sohn, J.H., Lee, S.K., Ok, J.K. and Yoo, W.S., 2007, "Comparison of Semi-Physical and Black-Box Model for Vehicle Dynamics Simulation," Vol. 21 No.3, *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp.264~271
- (4) Choi, D.H. and Yoo, W.S., 2000, "Efficiency of a Symbolic Computation Method for the Real Time Simulation," Vol.21 No.7, *Trans. Of the KSME A*, pp.1878~1881
- (5) Han, D.H., Sohn, J.H., Kim, K.S. and Yoo, W.S., 2000, "Development and Comparative Study on Tire Models in the AutoDyn7 Program," Vol. 14 No.7, *KSME Int. Journal*, pp.730~736
- (6) Cho, D.H., Lee, J.H., Yi, K.C. and Yoo, W.S., 2009, "A Study on the Real-Time Analysis of a 6*6 Autonomous Vehicle," Vol. 33 No.12, *Trans. Of the KSME A*, pp.1433~1441
- (7) Na, S.D., Kim, B.M. and Yoo, W.S., 2011, "4*4 Vehicle Simulation Using the Functional Suspension Model," *Spring Conference Proceedings of the KSME*, pp.71~72.
- (8) Kim, B.M., Na, S.D., Kim, K.S. and Yoo, W.S., 2012, "Verification of a Vehicle Dynamic Model for Real-Time HILS," *Conference Proceedings of the KSME*, pp.45~46.