

전동 조향 장치와 차량의 동시 시뮬레이션 기술 개발

장봉춘[#], 소상균^{**}

Co-Simulation Technology Development with Electric Power Steering System and Full Vehicle

BongChoon Jang[#], Sang-Gyun So^{**}

ABSTRACT

Most power steering systems obtain the power by a hydraulic mechanism. Therefore, it consumes more energy because the oil power should be sustained all the times. Recently, to solve this problem the electric power system has been developed and become widely equipped in passenger vehicles. In this research the simulation integration technique for an electric power steering system with MATLAB/SIMULINK and a full vehicle model with ADAMS has been developed. A full vehicle model interacted with electronic control unit algorithm is concurrently simulated with an impulsive steering wheel torque input. The dynamic responses of vehicle chassis and steering system are evaluated. This integrated method allows engineers to reduce the prototype testing cost and to shorten the developing period.

Key Words : manual steering system(수동 조향 시스템), electric power steering system(전동 조향 시스템), fuel efficiency(연료 절감), simulation integration (시뮬레이션 통합), electronic control unit(전자 제어장치), control system(제어시스템), rack displacement(랙 변위)

기호설명

M_r	mass of pinion-rack mechanism	B_r	damping of pinion-rack mechanism
J_h	inertia of hand-wheel	B_v	damping of steering shaft
J_m	inertia of motor	K_s	spring rate of torsional bar
J_v	inertia of steering column	T_h	input torque
J_s	inertia of entire mechanism	T_m	motor torque
B_w	damping of hand-wheel	T_a	motor assisted torque
B_m	damping of motor	T_d	motor damping torque
		T_s	sum of torque
		F_r	rack force
		n	gear ratio

접수일: 2003년 4월 2일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

교신저자: 안동대학교 기계공학부

E-mail bjang@andong.ac.kr Tel. (054) 820-6158

* 한밭대학교 제어계측공학화

- θ_w handle-wheel angle input from driver
- θ_v angle of torsion bar
- I_m motor current
- K_t motor constant
- V_s vehicle speed
- V_m motor speed

1. 서론

자동차에 있어 조향장치는 운전자가 진행하고 자 하는 방향으로 차를 이동시키기 위해 사용되는 장치로써 차량개발 초기 단계에서부터 수동 조향장치(manual steering system)가 사용되어 왔으나 작동시키는 데 큰 힘이 소요되므로 운전자에게 피로감을 가중시키는 문제점이 있다. 최근에는 센서 및 제어 기술의 발달로 작은 힘으로도 손쉽게 핸들을 돌릴 수 있는 조향시스템이 개발/적용되고 있는데 이러한 시스템이 동력 조향장치(power steering system)이다. 대부분의 승용차에 적용되고 있는 동력 조향장치는 유압에 의해 동력을 얻어내는 방식을 채택하고 있다^{1,2}. 이러한 장치를 부착한 차량은 오일

압력을 계속 유지해야 하기 때문에 수동 조향장치를 갖춘 차량에 비해 연료 소모가 많다.

동력 조향장치의 하나로 최근 개발이 활발히 진행되고 있는 전동 조향장치는 부가적인 조향력을 얻기 위해 유압 대신에 전기 모터를 사용하는 장치로써 유압펌프, 호스, 유체, 벨트 및 풀리 등과 같은 유압발생장치가 불필요하므로 비교적 시스템이 간단하고 가볍다. 또한 전동 조향장치의 경우 핸들을 돌릴 경우에만 모터가 동작하도록 설계된 시스템이기 때문에 연료소모량도 적은 장점이 있다. 이러한 이유 때문에 최근에는 전동 조향장치의 모델링³, 하드웨어 및 소프트웨어 개발^{4,5,6}에 많은 연구가 집중되고 있고 전동 조향장치를 탑재하는 차량이 급증하고 있다.

본 논문에서는 전동 조향장치의 제어 알고리즘과 자동차 동적 모델의 인터페이스를 위한 동시 시뮬레이션기법의 개발에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이러한 동시 시뮬레이션 기법은 차량 동역학 및 제어 분야에서 최근 중요한 이슈가 되고 있다. 여기에서는 전동 조향장치의 제어 알고리즘을 MATLAB SIMULINK⁷를 이용하여 구성하고 이를

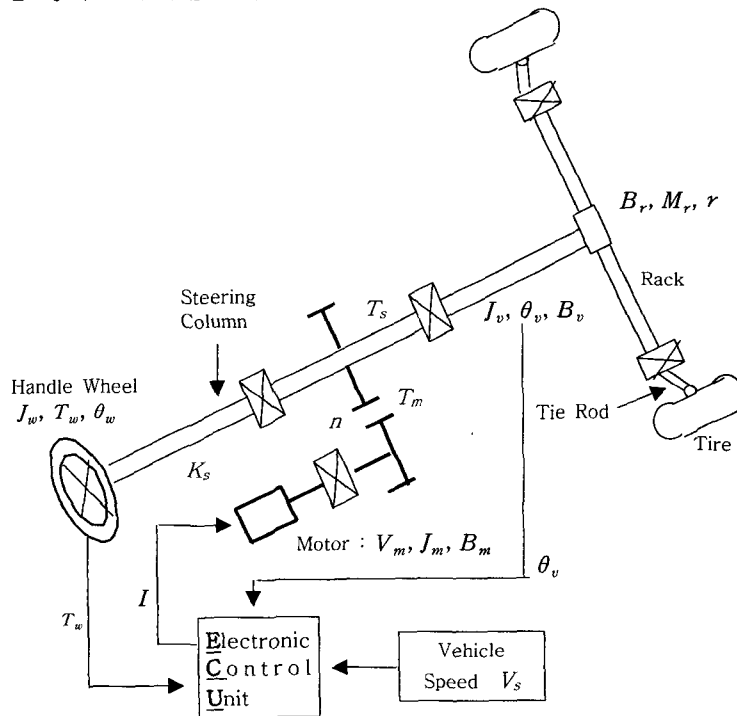


Fig.1 Schematic Diagram of Electric Power Steering Mechanism

차량 모델과 결합하기 위해 Mechanical Dynamic Inc. 사가 제공하는 ADAMS^{8,9,10} 프로그램을 이용하여 완전 차량 동역학 모델(full vehicle dynamic model)을 완성한 후, 이 두 프로그램을 이용하여 제어 알고리즘과 차량 모델이 결합되어 하나의 시스템처럼 동시에 동작하도록 하는 기법을 개발하는데 연구의 초점을 두고자 한다.

또한, 연구 결과의 성능 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었는데 한 쪽 바퀴에 범프 입력이 가해지는 경우에 대해 전동 조향시스템의 제어 알고리즘과 차량모델이 동시에 상호 동작이 가능하다는 사실이 시뮬레이션을 통해 확인되었고¹¹, 본 연구에서는 펄스형태의 조향 토크입력(steering input torque)을 이용한 시뮬레이션 결과가 보여진다.

2. 시스템별 모델 구성

본 절에서는 전동 조향장치의 구조 및 제어 알고리즘에 관한 전반적인 사항과 조향장치, 서스펜션, 타이어를 포함하는 완전 차량모델 구성에 관하여 논의한 후에 전동 조향장치 모듈과 차량 모델 사이의 인터페이스 기법을 보임으로써 전동 조향

장치를 갖춘 차량의 동적 특성을 살펴보고자 한다.

2.1 전동 조향장치

전동 조향장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 조향기어, 조향 메커니즘, 전기모터 및 적절한 조향 응답성 확보를 위한 제어기 등의 부품들로 구성되어 있다. 중요한 입력 신호로는 스티어링 핸들에 가해지는 토크, 토션바 각속도와 차속 신호가 있는데 이 입력 신호들이 시스템 변수들과 함께 계속적으로 제어기에 입력된다. 그러면 제어기는 이러한 입력 값들을 토대로 조향 방향 및 조향 지원이 요구되는 토크의 크기를 결정하게 된다.

Fig. 2는 전동 조향장치의 제어 블록선도를 보여주고 있다. 운전자가 진행방향을 바꾸기 위해 핸들을 돌리면 차량을 운전자가 의도했던 대로 움직이도록 하기 위해 핸들에는 조향 입력토크가 가해지고 이로 인해 각도가 생성된다. 도로조건과 운전자의 방향전환 의도에 따라 핸들의 각을 감지하게 되고 만약 운전자가 의도했던 핸들의 조향각도와 앞바퀴에서의 실제 조향 각도 사이에 차이가 발생하게 되면 제어장치는 이를 줄이기 위해 요구되는 제어신호인 전류를 산출하여 모터에 보낸다. 이 신호를 이용하여 모터전류가 결정되면 여기에 모터

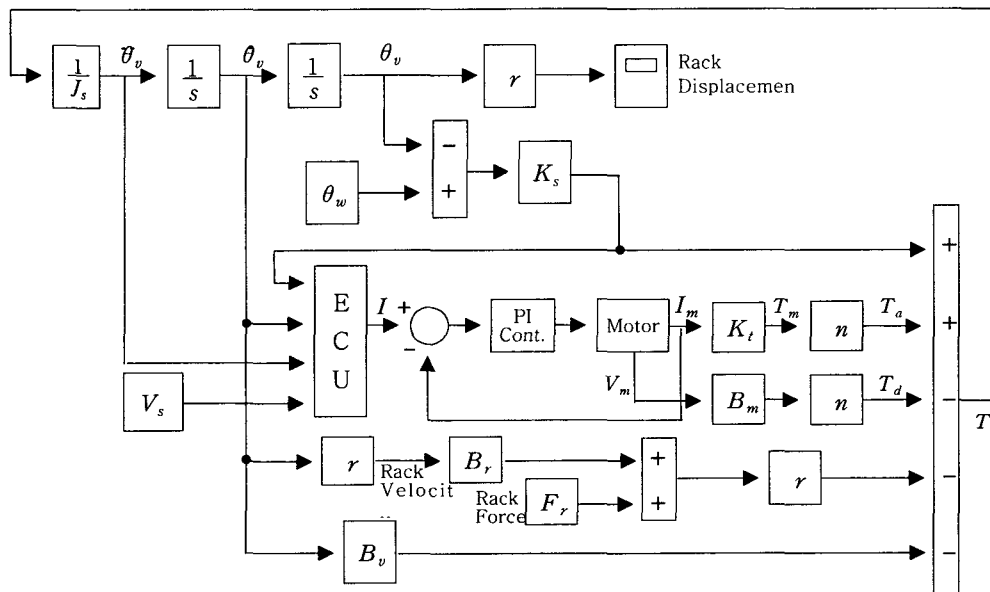


Fig.2 Control Block Diagram of Electric Power Steering System

상수와 기어비(gear ratio)를 곱하여 동력 조향장치에서 지원해야 하는 부가토크(T_a , motor assisted torque)가 계산된다. 이렇게 계산된 부가토크가 입력 조향토크와 함께 타이어의 반력 토크 및 조향 메커니즘의 마찰 손실 토크들을 극복하고 조향 축이 필요한 각도만큼 회전하도록 해준다. 따라서 운전자는 그 만큼의 노력 없이도 의도했던 바를 이룰 수 있기 때문에 조향이 용이하게 된다.

2.2 완전 차량 모델

완전 차량 모델은 상용 프로그램 ADAMS를 이용하여 구성하였으며 Fig. 3 에 예시되어 있다.

Fig. 3 은 다물체 동역학 모델(multi-body dynamic model)로써 347 자유도를 가지고 있으며 차량동역학 시뮬레이션을 위해 이미 내장되어 있는 앞뒤 비선형 서스펜션, 랙(rack)과 타이로드(tie-rod) 및 관련 조인트, 그리고 종 방향과 횡 방향의 결합된 힘을 고려한 타이어 모델 등으로 구성되어 있다. 이 다물체 모델은 무게중심 점에 주어진 속도에 따라 움직이게 되고 움직이는 경로는 랙 변위에 의해 제어된다. 스티어링 핸들에 가해진 입력토크와 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 도로에서부터 오는 자유제어(free control)라고 불리는 임펄스 조향토크입력(steering input torque)이 시뮬레이션에서 입력신호로 사용되었다.

3. 동시 시뮬레이션 해석

3.1 ADAMS with MATLAB

앞에서 언급한 바와 같이 전동 조향장치의 제어

알고리즘은 MATLAB을 사용하고 차량 모델은 ADAMS를 사용하였다. 이러한 각각의 프로그램을 상호 인터페이스를 해가면서 동작시키기 위한 동시 시뮬레이션에서는 각각의 프로그램에 대한 입력과 출력 변수들이 정해져야만 한다. 전체의 결합은 MATLAB에 있는 서브루틴에 의해 통제된다. 이 서브루틴이 데이터 교환을 위한 통로를 열어주고 매 시간 간격으로 ADAMS를 구동한다. 시뮬레이션 동안 각각의 프로그램은 동일한 시간간격을 사용한다. 각 시간간격의 시작과 끝에서 두 프로그램은 입력과 출력 데이터들을 상호 교환한다. 이러한 동시 시뮬레이션 기법은 제어 응용에서는 결합될 수 없으나 수치적으로 매우 안정적인 완전 차량모델에 대해서는 유용하다.

3.2 인터페이스 변수

수평으로 작용하는 힘이 자동차의 회전을 결정하는 랙 변위(rack displacement)를 발생시키도록 하기 위해 랙에 작용되었다. 그러므로 랙에 작용된 힘(rack force)은 차량 모델의 외부 입력 변수를 의미하게 되고 랙에 작용한 힘의 결과로 발생하는 랙의 변위와 속도가 외부 출력변수가 된다. Fig. 4 는 통합된 모델, 즉 차량 모델과 전동 조향장치의 제어 모듈 사이의 인터페이스에 대한 블록선도를 나타내 주고 있다. 전동 조향장치로 들어오는 입력변수들은 모터 토크(T_m), 차속(V_s)과 랙에 작용하는 힘(F_r)이고 전동 조향장치의 출력변수들은

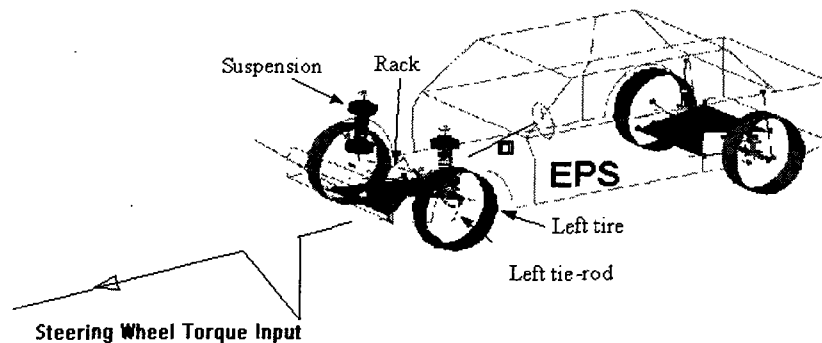


Fig.3 Steering Wheel Torque Input to Full Vehicle Model Equipped with Electric Power Steering System

결과적인 각(angle), 랙 변위와 랙 속도이다. Fig. 4에서 adams_sub로 표시된 음영부분은 ADAMS로부터 만들어진 완전 차량모델을 구성하는 서브시스템이다.

Fig. 4에서 예시되었듯이 10 MN/m의 계수를 갖는 스프링 하중은 랙과 피니언 기구의 강성을 나타내고 이것은 제어 모듈로부터의 출력인 랙 변위를 차량모델의 입력인 랙에 작용하는 힘으로 변환시키는 역할을 한다.

전체 시뮬레이션 시간은 4초이고 샘플 주기는 0.001초이다. 차량 모델과 전동 조향장치의 제어 알고리즘은 4,000 스텝의 연산이 수행되도록 매 0.001초마다 입력과 출력 신호를 교환한다. HP Unix 내에서 ADAMS version 10과 MATLAB 6.1을 이용하였고, CPU의 시뮬레이션 러닝타임은 11분이었다.

Fig. 5는 160km/h의 속도에서 조향 입력토크 값을 보여준다. Fig. 6은 Fig. 5의 입력에 대한 MATLAB에서의 조향 휠 각의 결과를 보여준다.

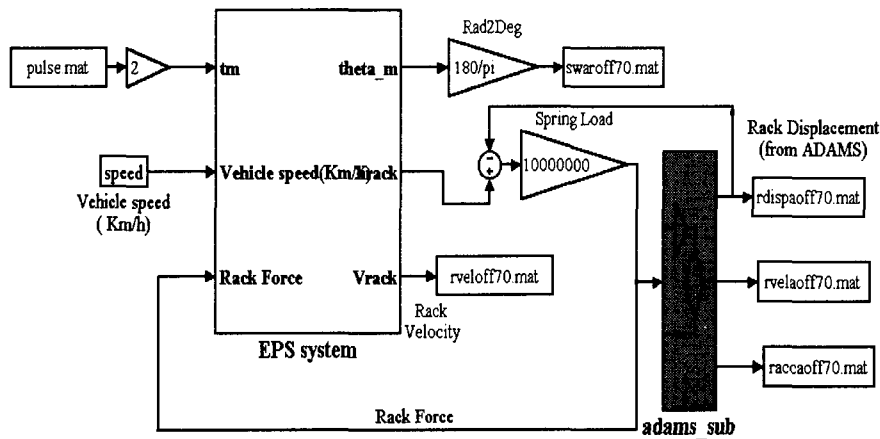


Fig. 4 Block Diagram of Co-Simulation Between Matlab Electric Power Steering Control System and ADAMS Car Model

4. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 시뮬레이션 결과들에 대해서만 고려하고자 한다. 새로운 전동 조향장치의 제어 알고리즘과 결합된 완전 차량 모델이 조향 입력토크에 대해 시뮬레이션 된다. 소프트웨어 ADAMS/Control을 이용하여 관심 있는 입력(Input)과 결과(Outputs)를 ADAMS 환경에서 정의해준다. 이때 여러개의 파일들이 생성되는데, 그 중의 하나가 MATLAB 파일이다. 그러면 MATLAB에서 하나의 파일을 불러들여 파라미터/변수들을 정의를 해준다. 그리고 시뮬레이션을 SIMULINK에서 실행시키면 MATLAB과 ADAMS가 동시에 시뮬레이션을 수행하게 된다.

Fig. 7은 MATLAB과 ADAMS로부터 얻어진 랙 변위를 보여주고 있는데 결과에서 알 수 있는 바와 같이 MATLAB과 ADAMS 사이에 랙 변위가 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 8은 전동 조향장치에 정보를 제공해 줄뿐만 아니라 ADAMS 차량 모델에 입력 값이 되는 타이로드 부하를 보여주고 있다. 조향 토크입력이 주어질 때 동적인 응답성들은 운전자가 스티어링 핸들을 자유롭게 돌린 후 0.8초 후에 영향을 받게 된다. 이러한 사실은 Fig. 6의 스티어링 휠 각, Fig. 7의 랙 변위, Fig. 8의 랙에 작용하는 힘의 결과들에 잘 나타나 있다. 10 MN/m의 강성을 갖는 스프링 하중은 제어 모듈의 출력 변수인 랙 변위를 차량모델의 입력변수인 랙에 작용하는 힘으로 변환시켜 줄 수 있을 만큼 충분한

강성을 갖는다. 스프링이 보다 부드러운 강성을 갖는 경우에는 변위의 오차가 점점 증가하게 되는 문제점이 발생된다. Fig. 9의 토션바 토크는 조향 입력토크를 추종하는 경향을 보인다. Fig. 10은 대응하는 모터전류를 잘 나타내 주고 있다. 차량이 방향 전환을 위해 조향을 했다가 1초 후에 다시 원래의 위치로 돌아오도록 할 경우 모터 전류는 양의 값으로 증가하는 경향을 보인다.

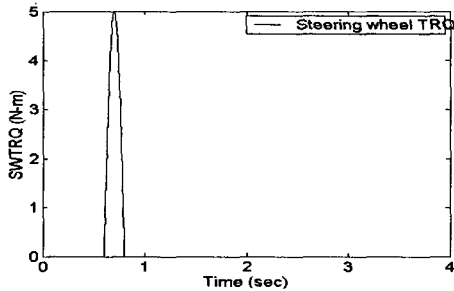


Fig. 5 Steering Wheel Torque Input at 100 mph

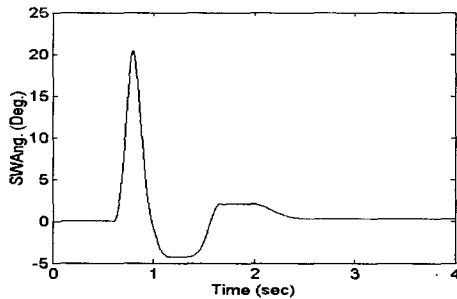


Fig. 6 Steering Wheel Angle from MATLAB

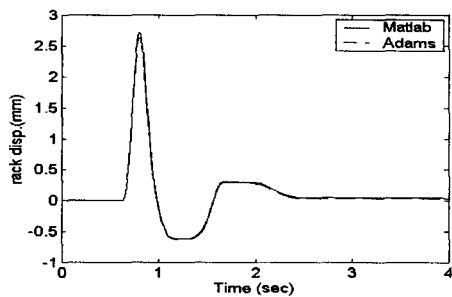


Fig. 7 Rack displacement from Matlab and ADAMS

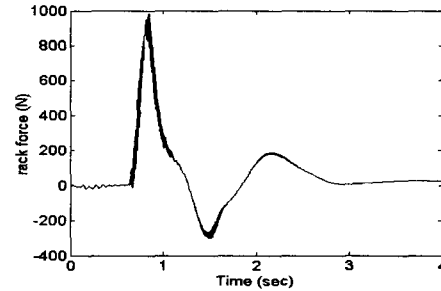


Fig. 8 Tie Rod Load

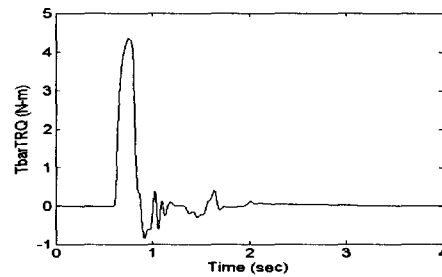


Fig. 9 Torsion Bar Torque

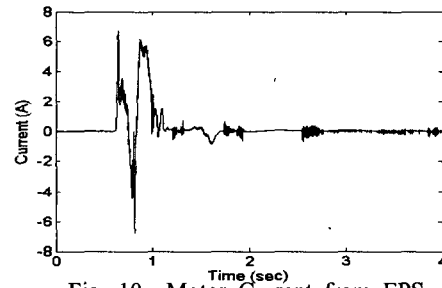


Fig. 10 Motor Current from EPS

5. 결론

본 연구에서는 차량 새시와 조향시스템의 동적 특성을 예측하기 위해 진동 조향장치 모델과 결합된 완전 차량모델을 개발하였다. 동시 시뮬레이션 기법을 사용하여 두 개의 컴퓨터 코드들이 각각 완성된 후 결합되었고, 결합된 차량모델이 자유제어 (Free Control 또는 Hands Free Motion)의 한 예로 임펄스 조향 입력토크에 대해 시뮬레이션 되었다. 그리고 차량 새시와 스티어링 시스템의 동적 응답성

들에 대한 분석이 이루어졌고 결과들의 비교를 통해 알 수 있듯이 랙 변위에 있어서는 매우 근접한 결과 값을 얻을 수 있었고 모터전류, 타이로드부하, 스티어링 휠 각 등과 같은 모든 결과들이 적절하게 나타났다.

MATLAB과 ADAMS의 동시 시뮬레이션을 위한 기술적인 방법이 본 연구에서 도출되었는데 연구결과가 우수한 성능을 나타냄이 증명되었고 이러한 기법은 차량 조종 안정성에 관한 성능종합과 분석뿐만 아니라 전동 조향장치 성능평가 및 보상 등을 위해서도 매우 유용하게 사용될 수 있다. 또한, 동시 시뮬레이션은 제어시스템 뿐만 아니라 브레이크 제어와 차량의 역학과 같은 복잡한 메커니즘 통합 분야에도 두 개의 다른 소프트웨어들을 씌으로써 매우 효과적으로 응용이 가능하다고 할 수 있다.

Design Parameters of Power Steering System for Passenger Cars on the Vehicle Steering Characteristics, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, Vol.4 No.4 1996, pp. 38-45.

7. MATLAB users manual, v. 5.3.1, 2000 (MathWorks, Inc.).
8. ADAMS/Solver Reference Manual, v. 10.0, 2000 (Mechanical Dynamics, Inc.).
9. Using ADAMS/Controls, ver. 10.0, (Mechanical Dynamics, Inc.), Aug. 15, 1999.
10. ADAMS Users Conf. Paper, 1997.
11. Jang B.C., Liang C.W., Co-Simulation/Integration of Electric Power Steering System and Vehicle Dynamics, GM Internal Report., GME2000-12, Dec., 2000.

참고문헌

1. Jang B.C. and Lee S.C., A Mathematical Model of a Power Steering System, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, Vol.5 No.4, 1997, pp.39-47.
2. Tak T.O., Kim K.C., and Yun J.R., "Steering Model for Vehicle Dynamics Analysis," Korean Society of Precision Engineering, Vol.16, No. 12, 1999. pp.214-221.
3. Hahn C.S., Shin J. and Oh J.E., A Study on the Graphical Inducing Method of State-space Equation of Bond Graph, Vol.22 No.9, 1998, pp.1675-1683.
4. Park T.J., Yun S.C. and Han C.S., A Development of Hardware-in-the-Loop Simulation System For a Electric Power Steering System, Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, A-Vol 24 No.12, 2000, pp. 2883-2890.
5. Hahn C.S., Rhee M.H., Oh J.E., Park H., Development of Simulator for Performance Test of Electric Power Steering of Light Weight Vehicle Steering Simulator, Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers, A-Vol. 25. No.6 2001, pp. 923-929.
6. Hwang S.H, Heo S.J. and Kim H.S., Effects of