

EPS 제어시스템 장착 승용차의 통합적 시뮬레이션 기법 연구

장봉춘#, 소상균*

Simulation Integration Technique of a Full Vehicle Equipped with EPS Control System

Bong-Choon Jang# and Sang-Gyun So*

ABSTRACT

Electric Power Steering (EPS) mechanism has become widely equipped in passenger vehicle due to the increasing environmental concerns and higher fuel efficiency. This paper describes the development of concurrent simulation technique and simulation integration technique of EPS control system with a dynamic vehicle system. A full vehicle model interacting with EPS control algorithm was concurrently simulated on a single bump road condition. The dynamic responses of vehicle chassis and steering system resulting from road surface impact were evaluated and compared with proving ground experimental data. The comparisons show reasonable agreement on tie-rod load, rack displacement, steering wheel torque and tire center acceleration. This concurrent simulation capability was employed for EPS performance evaluation and calibration as well as for vehicle handling performance integration and synthesis.

Key Words : Electric Power Steering (전동식 파워스티어링), Concurrent simulation (동시 시뮬레이션), Simulation integration (시뮬레이션 통합), Vehicle dynamics (차량 동역학), EPS control (전동식 파워스티어링 제어)

기호설명

C_h	: damping of handle-wheel	I_{g2}	: inertia of driven gear
K_t	: spring rate of torsion bar	T_m	: motor torque
C_m	: damping of motor	I_h	: inertia of handle-wheel
M_r	: mass of pinion-rack mechanism	I_m	: inertia of motor
C_r	: damping of pinion-rack mechanism	I_{sum}	: inertia of entire mechanism
n	: gear ratio	V_m	: motor speed
C_v	: damping of steering shaft	I_v	: inertia of steering column
I_{g1}	: inertia of drive gear	T_{sum}	: sum of torque applied to driven mechanism
T_h	: input torque	θ_h	: handle-wheel angle
		θ_v	: angle of lower shaft
		V_s	: vehicle speed

☞ 접수일: 2006년 2월 7일; 게재승인일: 2006년 4월 26일

교신저자, 안동대학교 기계공학부

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

* 한밭대학교 제어계측공학과

1. 서 론

자동차에 있어 조향장치는 운전자가 임의의 방향으로 선회시키기 위하여 사용되는 장치로서 차량개발 초기 단계에서부터 수동 조향장치(manual steering system)가 사용되어 왔으나 작동시키는데 큰 힘이 소요되므로 운전자에게 피로감을 가중시키는 문제점이 있다. 최근에는 센서 및 제어기술의 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.¹

동력 조향장치의 하나로 개발이 활발히 진행되고 있는 전동 조향장치는 부가적인 조향력을 얻기 위해 유압 대신에 전기 모터를 사용하는 장치로서 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 연구에서는 전동 조향장치의 제어 알고리즘과 자동차 동적 차량 모델의 인터페이스를 위한 동시 시뮬레이션기법의 개발에 추가적으로 시뮬레이션 통합기술의 개발⁷ 및 비교를 수행하고자 한다. 더불어, 실험을 통하여 결과를 비교하고, 시뮬레이션 최적화 방법에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이러한 동시 시뮬레이션 기법은 차량 동력학 및 제어 분야에서 최근 중요한 이슈가 되고 있다. 여기에서는 전동 조향장치의 제어 알고리즘을 MATLAB SIMULINK^{8,9}를 이용하여 구성하고 이를 차량 모델과 결합하기 위해 Mechanical Dynamic Inc. 사가 제공하는 ADAMS^{10,11} 프로그램을 이용하여 완전 차량 동력학 모델(full vehicle dynamic model)을 완성한 후, 이 두 프로그램을 이용하여 제어 알고리즘과 차량 모델이 결합되어 하

나의 시스템처럼 동시에 동작하도록 하는 기법을 개발하였는 바 시뮬레이션 통합기술과의 비교 연구에 초점을 두고자 한다.

또한, 연구 결과의 성능 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었는 데 한 쪽 바퀴에 범프 입력이 가해지는 경우에 대해 전동 조향시스템의 제어 알고리즘과 차량모델이 동시에 상호 동작이 가능하다는 사실을 시뮬레이션을 통해 확인하고 몇 가지 실험결과와 비교하고자 한다.

2. 시스템별 모델 구성

본 장에서는 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 조향장치를 갖춘 차량의 동적 특성을 살펴보고자 한다.

2.1 전동 조향장치

전동 조향장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 조향기어, 조향 메카니즘, 전기모터 및 적절한 조향 응답성 확보를 위한 제어기 등의 부품들로 구성되어 있다. 중요한 입력 신호로는 스티어링핸들에 가해지는 토크, 토손바 각속도와 차속신호가 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 모터상수와 기어비(gear ratio)를 곱하여 동력 조향장치에서 지원해야 하는 부가토크 (T_a , motor

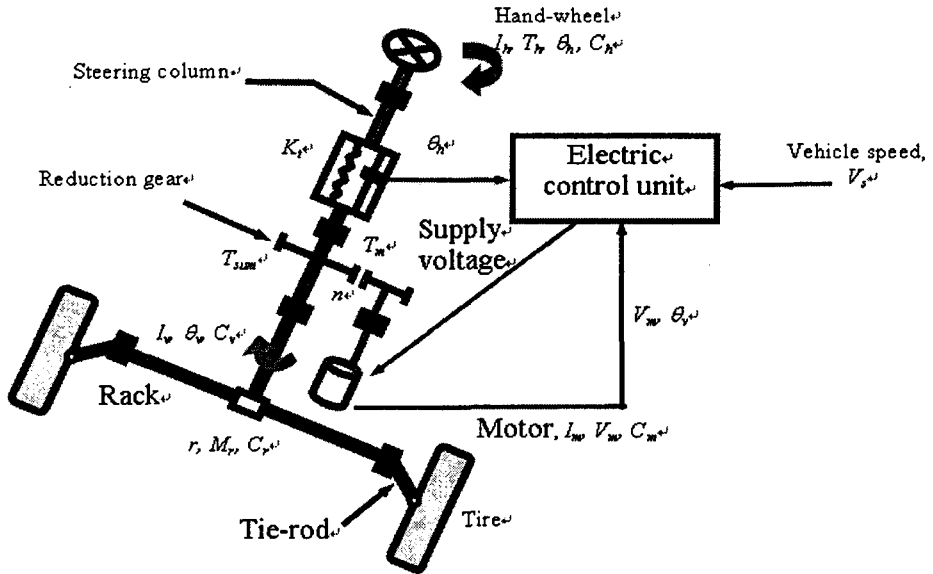


Fig. 1 Layout of EPS mechanism

assisted torque)가 계산된다. 이렇게 계산된 부가토크가 입력 조향토크와 함께 타이어의 반력 토크 및 조향 메카니즘의 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 ADAMS 를 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 제어 된다. 스티어링 핸들에 가해진 입력토크와 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 운전자의 왼쪽 바퀴들만 범프위를 통과할 수 있도록 일정한 스티어링 앵글 입력이 시뮬레이션에서 입력신호로 사용되었다. 본 연구에서 사용된 차량은 Saturn SUV 차종으로서 제원은 Table 1 과 같다.

Table 1 Saturn SUV Specifications

Mass of the entire vehicle, $M = 1411$ kg
Sprung mass of the vehicle, $M_s = 1269$ kg
Unsprung mass of the vehicle, $M_{us} = 141.1$ kg
Overall height of the entire vehicle, $H = 1.689$ m
CG height from ground, $H_{cg} = 0.6$ m
Wheel base of the vehicle, $L = 2.708$ m
Distance of CG from front axle, $a = 1.044$ m
Distance of CG from rear axle, $b = 1.664$ m
Front track width, $T_f = 1.549$ m
Rear track width, $T_r = 1.549$ m
Mass moment of Inertia about x-axis, $I_{xx} = 450$ kgm ²
Mass moment of Inertia about y-axis, $I_{yy} = 2303$ kgm ²
Mass moment of Inertia about z-axis, $I_{zz} = 2446$ kgm ²
Yaw product, $I_{xz} = 45$ kgm ²
Front and Rear suspension type – Independent

3. 통합분석 프로세스

차량에서 EPS 시스템의 기능은 운전자의 핸들 입력, 차량속도와 랙의 힘에 근거하여 원하고자

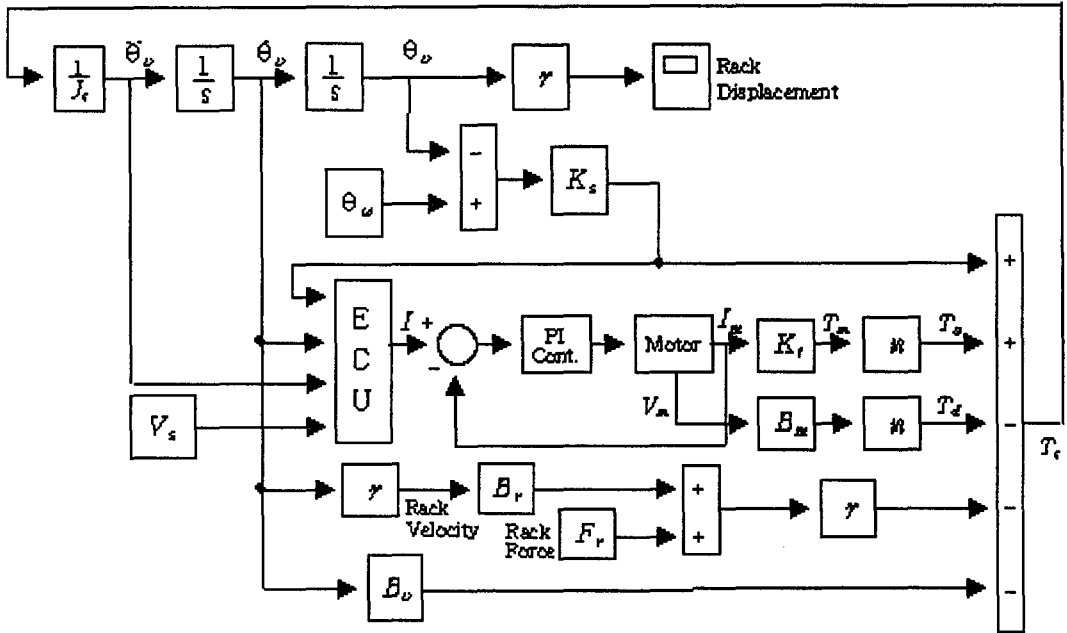


Fig. 2 The Block Diagram of Electric Power Steering Control System

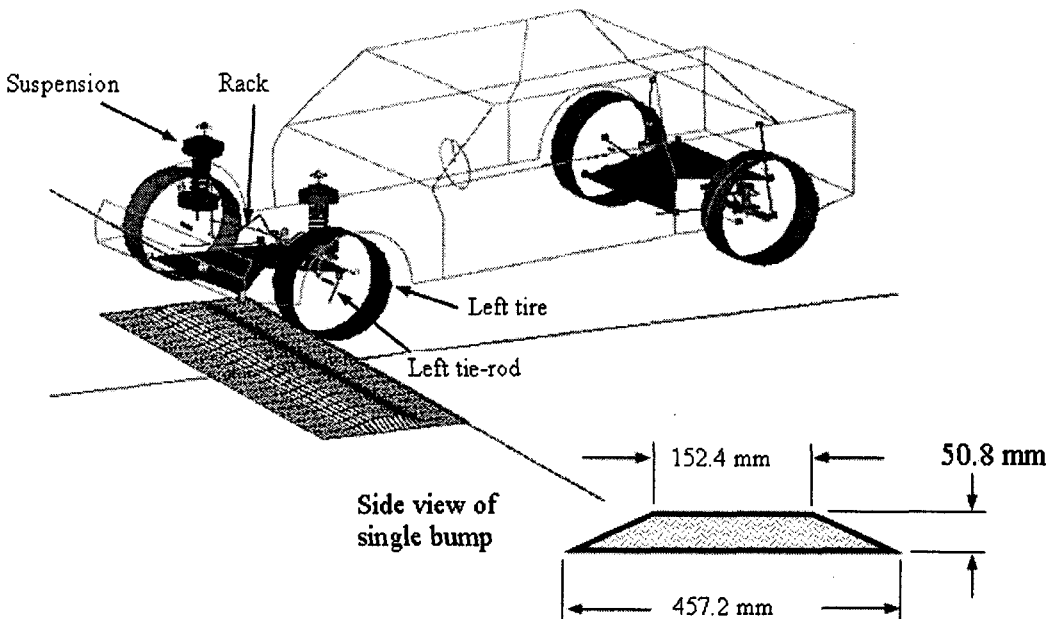


Fig. 3 ADAMS full vehicle model and single bump

하는 랙 변위와 속도를 제공하는 것이다. EPS 가 탑재된 차량의 모델링과 동적성능 분석은 강건하고 정확한 프로그램 코드를 요구한다. ADAMS 와 같은 다물체 동역학 시스템 코드가 차량 새시의 동적 특성을 연구하기에 적합하다. 비록, PID 와 같은 기본적인 제어기가 ADAMS 에서 쉽게 사용될 수 있을지 모르나, EPS 와 같은 복잡한 제어 알고리즘은 Matlab/Simulink 또는 이에 상응하는 소프트웨어를 요구한다. 본 연구에서는 EPS 제어 알고리즘이 탑재된 완전차량모델을 통합모델링하기 위하여 ADAMS/DADS 와 Matlab 이 사용되었다.

3.1 시뮬레이션 접근방법들

본 절은 동시시뮬레이션 기술과 시뮬레이션 통합기술에 대해 분석한다. Fig. 4 는 시뮬레이션 접근방법들을 보여준다.

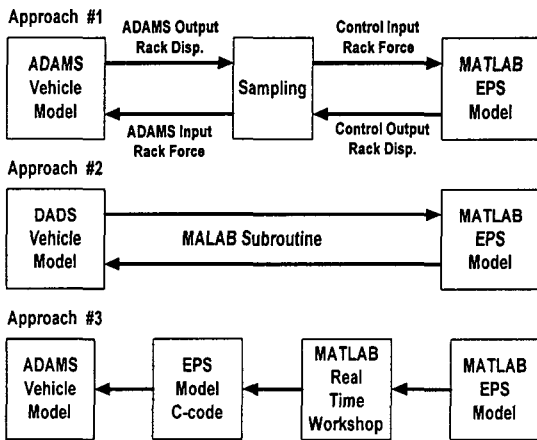


Fig. 4 Different simulation techniques

3.1.1 동시 시뮬레이션 기술

동시 시뮬레이션에서는 Fig. 5 와 같이 전동 조향장치의 제어 알고리즘은 MATLAB 을 사용하고 차량 모델은 ADAMS 를 사용하였다. 이러한 각각의 프로그램을 상호 인터페이스를 해가면서 동작시키기 위한 동시 시뮬레이션에서는 각각의 프로그램에 대한 입력과 출력 변수들이 정해져야만 한다. 전체의 결합은 MATLAB 에 있는 서브루틴에 의해 통제된다^{10,11}. 이 서브루틴이 데이터 교환을 위한 통로를 열어주고 매 시간 간격으로 ADAMS 를 구동한다. 시뮬레이션 동안 각각의 프로그램은 동일한 시간간격을 사용한다. 각 시간간격의 시작

과 끝에서 두 프로그램은 입력과 출력 데이터들을 상호 교환한다. 이러한 동시 시뮬레이션 기법은 복잡한 메카트로닉스 시스템에 대해서는 유용하다.

3.1.2 시뮬레이션 통합기술 - I - MATLAB 과 DADS 서브루틴 통합

시뮬레이션 통합에서는 Fig. 6 과 같이 첫번째로 DADS¹² 차량모델과 MATLAB 이 사용되었다. 완전차량의 DADS 모델은 MATLAB 의 서브루틴(subroutine)으로 사용되고, MATLAB 이 시뮬레이션 통합을 구동한다. DADS 는 동적차량모델로부터 관심있는 출력들을 계산하고 MATLAB 은 EPS 시스템의 제어 통합을 수행한다. 완전차량모델을 가진 DADS 모델은 MATLAB 서브루틴인 S-function(S-함수)로서 표현된다.

3.1.3 시뮬레이션 통합기술 - II - ADAMS 과 ADAMS 서브루틴 통합

두 번째 시뮬레이션 통합 방법에서는 MATLAB with SIMULINK 의 한 툴박스인 소위 'Real Time Workshop (RTW)¹¹' 이 C 코드를 생성하기 위해 사용되었다. MATLAB 시뮬링크의 RTW 는 하나의 함수, 'make_rtw' 를 갖는 데 이는 EPS 모델을 C 코드로 전환한다. 이렇게 생성된 파일들은 MATLAB 에 의해 자동적으로 생성되는 몇 개의 C 코드와 헤더파일들로 구성된다. 그러나 C 코드들은 비록 SIMULINK 모델이 단순하다 할지라도 불필요하게 긴 문장들을 포함하고 프로그램이 복잡해진다. PC 에서 생성된 C 코드는 UNIX 환경에서의 ADAMS 사용자 에게는 플랫폼의 호환 능력이 없어서 실행하기가 어려운 점이 있다. 게다가 C 코드는 그 자신의 적분기인 "ode2.c"를 가지고 있고, ADAMS 에서 분리와 적분기 통합의 필요가 있다. 이러한 분리와 통합은 프로그램의 복잡성을 가중시킨다.

3.2 인터페이스 변수들

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.

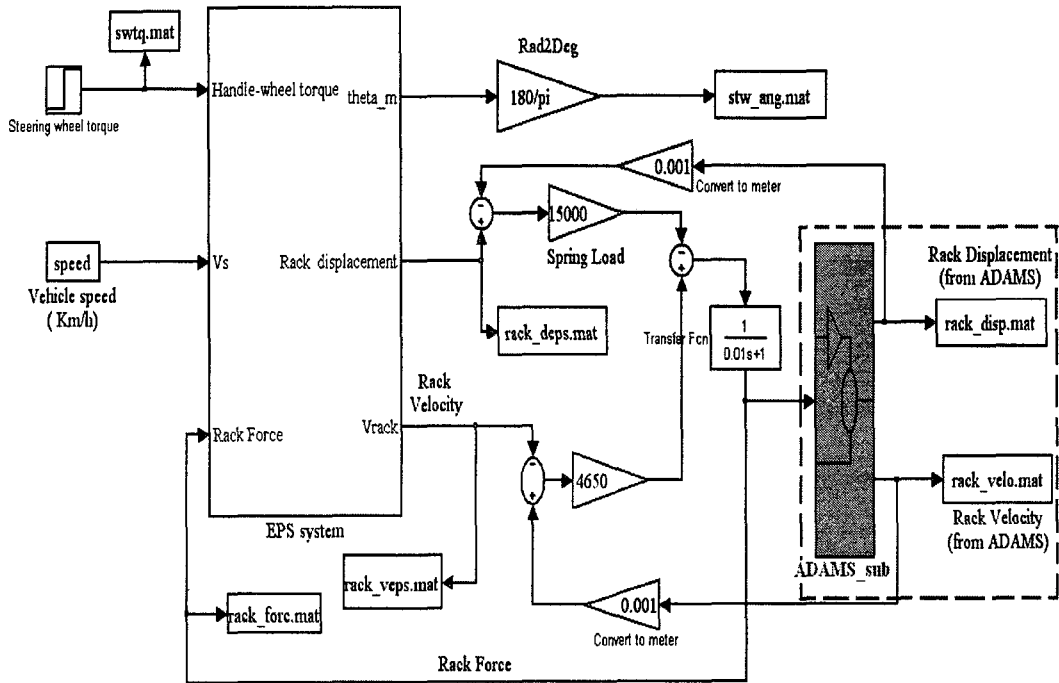


Fig. 5 Concurrent Simulation technique executing two softwares MATLAB EPS and ADAMS model

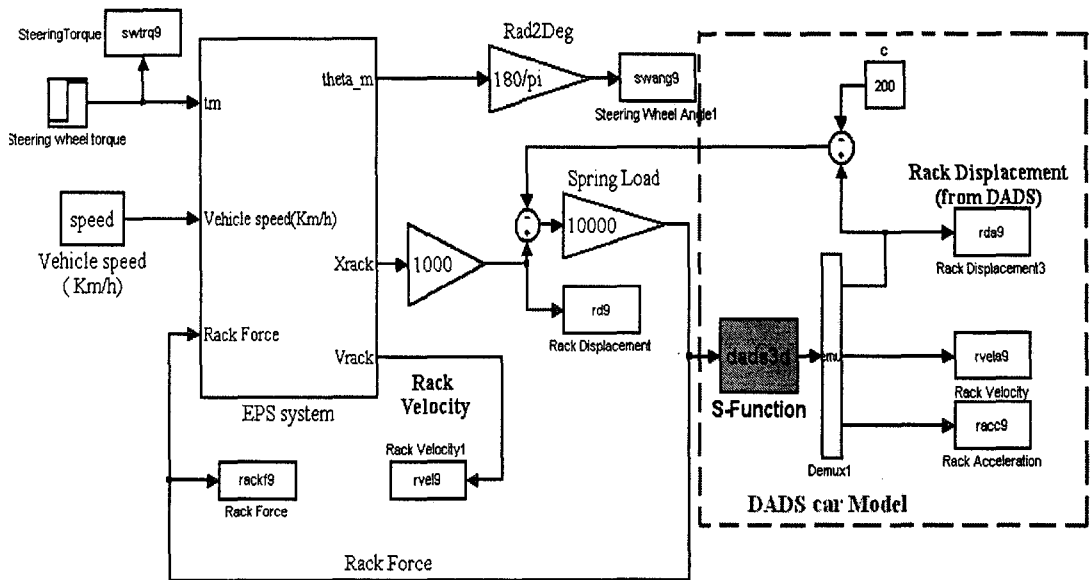


Fig. 6 Simulation Integration technique executing MATLAB only with DADS subroutine

Fig. 5는 동시 시물레이션 기술의 통합된 모델, Fig. 6은 시물레이션 통합기술의 모델, 즉 차량 모델과 전동 조향장치의 제어 모듈 사이의 인터페이스에 대한 블록선도를 각각 나타내 주고 있다. 전동 조향장치로 들어오는 입력변수들은 모터 토크, 차속과 랙에 작용하는 힘이고 전동 조향장치의 출력변수들은 결과적인 각(angle), 랙 변위와 랙 속도이다.

4. 결과고찰

본 절에서는 시물레이션 결과와 실험 결과와의 비교에 대해 논의한다. 실제 차량이 주행 테스트장에서 세 번 실험되었다. 이 차량은 65.8m의 직경을 가진 원형 경로를 따라 32 km/hour의 속력으로 운행되었다. 차량의 횡가속도가 0.22g에 도달했을 때 운전자측의 타이어들만이 범프를 통과한다. 이 범프의 크기는 Fig. 3에 묘사되어진다. 차량의 성능평가를 위하여 단지 왼쪽 측면 타이어들만 이 범프를 통과하는 데 이는 도로표면의 충격으로부터 커다란 불균형 하중이 차량의 새시에 전달하는 효과가 있다. 이러한 주행과 도로조건하에서 차량의 동적특성들을 파악하기 위하여 차량 내부에 몇 개의 가속도계를 설치하였다.

EPS 제어 알고리즘을 장착한 완전차량모델이 실제 주행 테스트장에서 수행된 것처럼 똑 같은 주행조건과 도로조건하에서 시물레이션 되었다. 소프트웨어 ADAMS/Control을 이용하여 관심 있는 입력과 결과를 ADAMS 환경에서 정의해준다. 이때 여러 개의 파일들이 생성되는데, 그 중의 하나가 MATLAB 파일이다. 그러면 MATLAB에서 하나의 파일을 불러들여 파라미터 또는 변수들을 정의해준다. 그리고 시물레이션을 SIMULINK에서 실행시키면 MATLAB과 ADAMMS가 동시에 시물레이션을 수행하게 된다. 전체 시물레이션 시간은 3초이고 샘플 주기는 0.001초이다. 차량 모델과 전동 조향장치의 제어 알고리즘은 3,000 스텝의 연산이 수행되도록 매 0.001초마다 입력과 출력 신호를 교환한다. HP Unix 내에서 ADAMS version 10과 MATLAB 6.5을 이용하였고, CPU의 시물레이션 실행시간은 11분이었다.

시물레이션 결과와 실험데이터의 비교는 차량

이 범프를 통과할 때 시간의 영역에 초점을 두었다. Fig. 7은 시간의 영역에서 좌측 앞면 타이로드 하중의 시물레이션 결과와 실험결과를 보여준다. Fig. 8과 9는 좌측 앞면 타이어 중심에서 fore/aft 가속도와 수직방향의 가속도를 각각 보여준다. Fore/aft 가속도는 2초 근처에서 약간의 불일치가 생기는 데 이는 범프를 통과할 때 운전자가 가하는 약간의 스티어링 입력 및 전체 차량모델의 완벽하지 못함에서 약간의 오차를 불러일으키는 것 같다. 수직 가속도도 크기는 정확히 일치하지 않으나 스파이크가 일어나는 주기는 잘 일치하고 있음을 보여준다.

Fig. 10은 동시시물레이션과 시물레이션 통합기술을 사용하였을 때의 결과들을 비교하여 보여준다. 다른 동적 응답들이 비슷하기에 횡가속도의 결과만 비교하였고, 응답의 특성이 거의 비슷하였다. 하지만 시물레이션 통합기술을 사용하였을 때 시물레이션 실행시간이 24시간이 되어 비효율적이었다. Fig. 11은 모터의 전류 결과를 실험결과와 비교하여 보여주는데 2.3초에 범프를 통과할 때 크기와 주기가 근접한 결과임을 보여주고 있다. Fig. 12역시 동시시물레이션과 시물레이션 통합기술을 이용했을 때의 랙 변위 결과를 비교하며 거의 일치함을 보여준다.

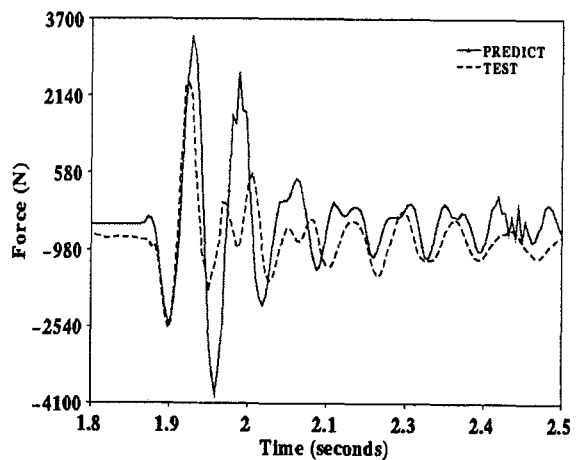


Fig. 7 Comparison of Load on the left-front tie-rod

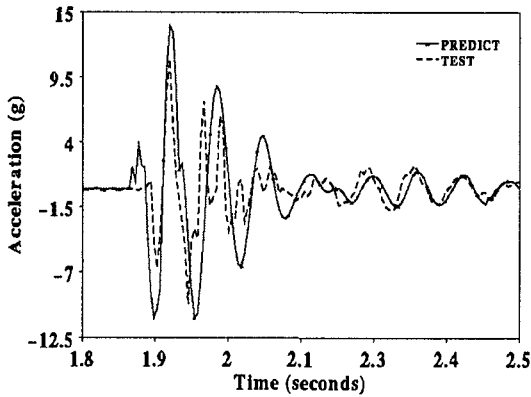


Fig. 8 Comparison of Left-front tire center fore/aft acceleration

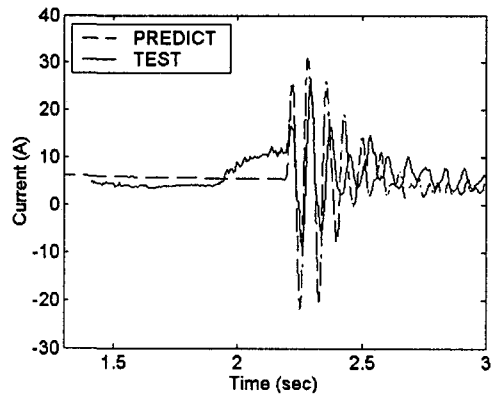


Fig. 11 Comparison of motor currents from 'Co-Simulation' and Experiment

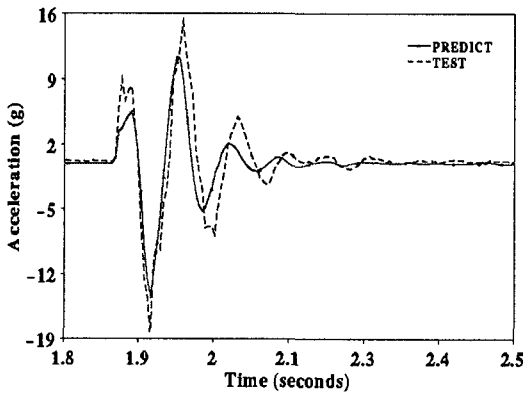


Fig. 9 Comparison of Left-front tire center vertical acceleration

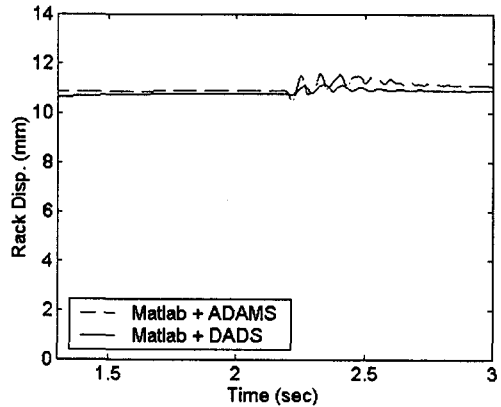


Fig. 12 Comparison of rack displacements from 'Co-Simulation' and 'Simulation Integration' Method

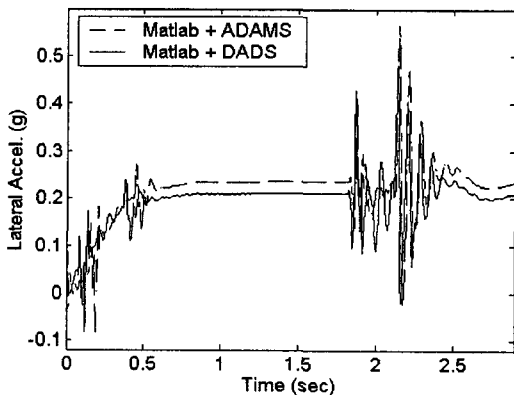


Fig. 10 Comparison of lateral accelerations from 'Co-Simulation' and 'Simulation Integration' Methods

5. 결론

(1) 본 연구에서는 차량 샤시와 조향시스템의 동적 특성을 예측하기 위해 전동 조향장치 모델과 결합된 완전 차량모델을 개발하였다. 두 개의 컴퓨터 코드들이 각각 완성된 후 결합되었고, 결합된 차량모델이 동시 시뮬레이션 기법과 시뮬레이션 통합 기법을 사용하여 시뮬레이션 되었다.

(2) 그리고 차량 샤시와 스티어링 시스템의 동적 응답성들에 대한 분석이 이루어졌고 결과들의 비교를 통해 알 수 있듯이 랙 변위에 있어서는 매우 근접한 결과치를 얻을 수 있었고 모터전류, 타이로드부하, 휠 수직 가속도 등과 같은 모든 결과

들이 실제작동과 유사하게 나타났다.

(3) MATLAB 과 ADAMS 의 동시 시뮬레이션을 위한 기술적인 방법과 차량모델을 하나의 서브루틴으로 만들어 사용했으나 시뮬레이션 통합기법은 효율성이 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 또, 제어 알고리즘을 서브루틴으로 하는 것은 프로그램의 복잡성을 가져와서 비효율적인 것을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 동시시뮬레이션의 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 조향 제어시스템 뿐만 아니라 브레이크 제어와 차량의 역학과 같은 복잡한 메카트로닉스 시스템 분야에도 매우 효과적으로 응용이 가능하다 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한밭대학교 2003 년도 교내학술연구비 및 안동대학교 2004 년도 특별학술연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nakayama, T. and Suda, E., "The present and future of electric power steering," Int. J. Veh. Des, Vol. 15, pp. 243-254, 1994.
2. Okamoto, K., Chikumr, I., Saio, N. and Miyazak, H., "Improvement of driver's feel of electric power steering," SAE paper, No. 89-0079, 1989.
3. Smith, J. M., Ferries, G. R. and Arbanas, R. L., "An analytical control systems approach to steering shudder," SAE paper, No. 95-0125, 1995.
4. Olson, W. W. and Milacic, D., "Development of anti-lock braking traction and control systems of the advanced technology demonstrator II using DADS simulation code," Int. J. Veh. Des., Vol. 17, pp. 295-316, 1996.
5. Patwardhan, S., Tan, H. and Guldner, J., "A general framework for automatic steering control: system analysis," Proc. American Control Conf., pp. 1598-1602, 1997.
6. Badawy, A., Bolourchi, F., Zuraski, J. A. and

- Chandy, A., "Modeling and analysis of an electric power steering," SAE Paper, No. 01-0399, 1999.
7. Jang, B. C., "Co-Simulation technology development with Electric Power Steering System and Full Vehicle," J. of KSPE, Vol. 21, No. 1, pp. 94-100, 2005.
8. MATLAB user's manual, v. 5.3.1, 2000.
9. MATLAB/SIMULINK Real Time Workshop (RTW), MATLAB user's manual, v. 5.3.1, (MathWorks, nc.), 2000.
10. ADAMS/Solver Reference Manual, v. 10.0. , 2000.
11. Using ADAMS/Controls, ver. 10.0, (Mechanical Dynamics, Inc.), Aug. 15, 1999.
12. DADS Reference Manual, ver. 9.5.1, 2000.