

ECU-in-the Loop Simulation을 사용한 운전석 현가제어기의 성능평가

Performance Evaluation of a Suspension Seat Controller Using ECU-in-the-Loop Simulation

백 윤 경* · 이 지 웅* · 이 종 석*

Woon Kyung Baek, Ji Woong Lee and Jong Suk Lee

(2007년 9월 18일 접수 ; 2007년 11월 9일 심사완료)

Key Words : EILS(ECU-in-the-loop 시뮬레이션), Real-time Model(실시간 모델), Suspension Seat(현가식 운전석), Performance Evaluation(성능평가), MR Damper(MR댐퍼), Sky-hook Algorithm(스카이-훅 알고리즘)

ABSTRACT

Repeated hardware tests and tuning, investing cost and time, are usually required to assure a satisfactory performance of the suspension seat. In this study, an EILS(ECU-in-the-loop) method was proposed to develop a controller for a semi-active suspension seat with a MR(magneto-rheological) damper. EILS system was developed using a real-time seat dynamics model communicating with ECU hardwares under a closed loop environment utilizing Matlab/Simulink and xPC TargetBox™. A sky-hook based control algorithm with optimized damping coefficients was verified to reduce the energy consumption and to improve the vibration response performance.

1. 서 론

상용차의 현가식 운전석은 차량 진동으로부터 운전자로의 직접적인 진동전달을 완화시켜 운전자의 피로를 감소시키고 승차감을 향상하는 효과가 있다^(1,2).

현가식 운전석은 보통 상하로 움직일 수 있는 X 링크 구조에 공기스프링과 수동형 댐퍼를 설치한 형태가 사용된다. 이 수동형 댐퍼는 감쇠성능이 고정되어 있으므로 다양한 운전자의 체중 및 가진 조건에 대해서는 적절하게 대응하지 못한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 미국의 Lord사에서는 MR유체를 이용한 반능동 MR댐퍼를 제작하고, 이를 Bostrom사와 National Seating사의 현가식 운전석

에 적용하여 운전자들로부터 큰 호평을 받고 있다. 국내에서도 소비자의 요구에 따라 진동저감에 보다 능동적으로 대처할 수 있는 MR댐퍼를 적용한 현가식 운전석에 대한 연구가 수행된 바 있다⁽³⁾.

상용차의 경우 노면에 의한 진동은 현가스프링, 댐퍼, 고무부싱 등으로 구성된 주 현가장치(primary suspension)를 통해 고주파대역의 진동이 1차적으로 완화된 후 주로 10 Hz까지의 저주파대역의 진동이 운전석에 전달된다. 그러나 이러한 저주파수의 진동은 인체가 불쾌하게 느끼는 진동수 대역을 포함하고 있으며 이를 적절하게 완화하는 것이 현가식 운전석의 목표이다.

이러한 현가식 운전석은 궁극적으로 그 성능을 평가하기 위해 많은 시간과 비용이 지불되는 진동시험과 실차시험이 요구된다. 현가식 운전석의 핵심부품 중 하나는 현가제어기이며 이는 ECU(electronic control unit)와 센서들로 구성된다. ECU는 현가제어 알고리즘과 신호처리장치를 탑재하고 있으며 이

† 교신저자: 정희원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr
Tel : (051)620-1615, Fax : (051)620-1615
* 부경대학교 대학원 지능기계공학전공

의 제품화 성능을 검증하는 데는 많은 시뮬레이션과 반복시험이 필요하다.

한편 최근에 개발된 HILS(hardware-in-the-loop simulation)기법은 수치적으로 모델링하기 어려운 구성품의 실제 하드웨어를 사용함으로써 수학적 모델과 페루프 시스템을 만들어 실차시험이나 순수한 수치 시뮬레이션의 단점을 보충할 수 있는 시뮬레이션 방법이다^(4,5).

이 연구에서는 이 HILS기법을 응용하여 운전석 현가제어기의 성능을 효율적으로 평가하기 위해 운전석의 동역학 모델과 ECU하드웨어를 포함하는 EILS(ECU-in-the-loop simulation)를 수행하였다.

2. 현가식 운전석의 구조와 모델

2.1 현가식 운전석의 구조와 모델링

이 연구에서 사용한 현가식 운전석의 운동기구는 X형의 링크 구조로서 수직 방향의 운동만을 허용하며 개략적인 구조는 Fig.1과 같다. 이 모델에 대한 간단한 운동방정식은 식 (1)과 같이 유도될 수 있다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = -c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) - k_1(x_1 - x_0) - u \quad (1)$$

식 (1)에서 u 는 MR댐퍼의 제어 감쇠력이며, x_1 및 x_0 는 각각 링크 상부 및 하부의 변위이다.

이 연구의 현가식 운전석 모델에 적용된 각 파라미터의 수치는 Table 1과 같다.

2.2 현가식 운전석의 실시간 모델 및 검증

EILS를 이용하여 현가제어기의 성능을 효율적으로 검증하기 위해서는 운전석 기구, 스프링 및 댐퍼의 위치가 실제적으로 고려된 동역학모델과 ECU를 사용한 실시간 시뮬레이션이 되어야 한다.

(1) 현가식 운전석의 실시간 모델

현가식 운전석의 수학적 모델을 만들기 위해

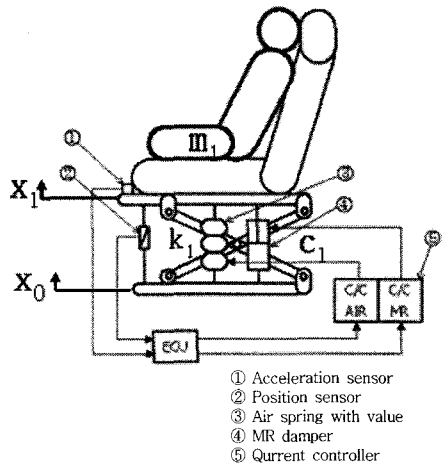


Fig. 1 Structure of seat suspension system

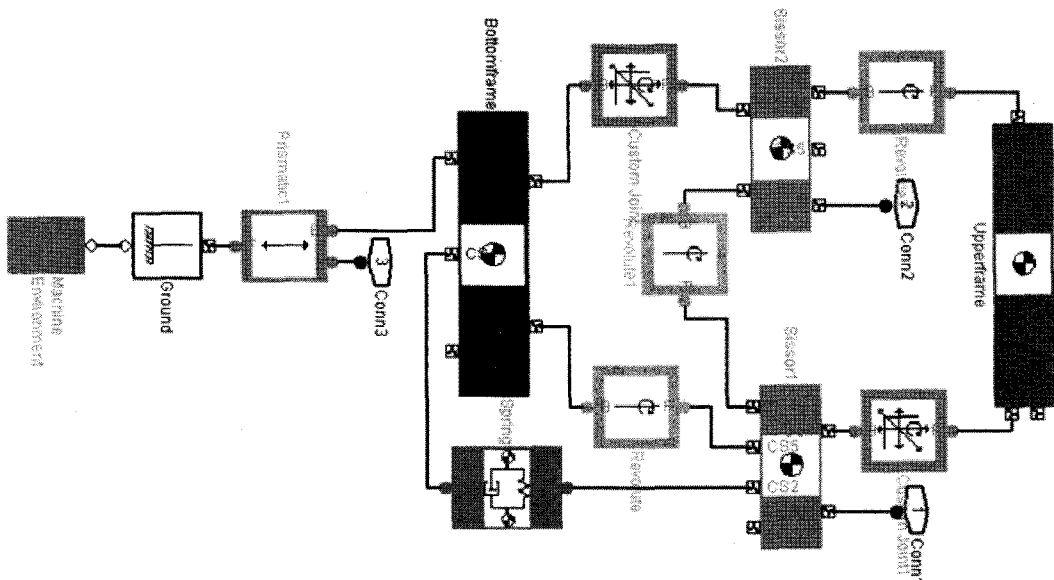


Fig. 2 Real-time model of seat suspension

Table 1 Parameters of the MR seat suspension system

Parameter	Symbol	Unit	Value
Seat frame mass	m_1	kg	85
Suspension damping (Passive)	c_1	Ns/m	3,000
Suspension stiffness	k_1	N/m	23,400

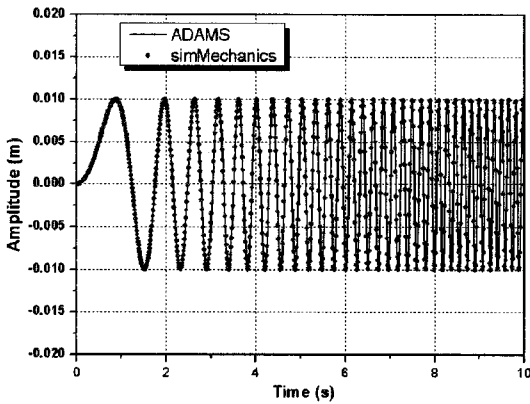


Fig. 3 System excitation

MATLAB/Simulink의 SimMechanics 프로그램을 사용하였다. SimMechanics는 Simulink의 확장 프로그램으로서 기계시스템의 기구모델링 및 동역학시뮬레이션 도구이다. Fig. 2는 SimMechanics를 이용한 현가식 운전석의 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

SimMechanics에서 현가식 운전석 모델은 상부프레임과 하부프레임을 가지며, 한 쌍의 x형 링크를 가진다. 이들을 구속하기 위하여 5개의 구속조인트가 사용되었다. 현가식 운전석모델의 총 자유도는 1 자유도가 된다.

(2) 실시간 현가식 운전석 모델의 검증

SimMechanics를 사용한 현가식 운전석의 실시간 모델의 타당성을 검증하기 위하여 범용 기구동역학 해석 프로그램인 ADAMS의 해석결과와 비교하였다. Fig. 4~5는 현가식 운전석 모델에 Fig. 3과 같은 스위프(sweep) 가진을 주었을 때 현가식 운전석 상부질량(sprung mass)의 가속도와 속도를 비교한 그래프이다. 이 연구에서는 현가식 운전석의 공진영역이 속해 있는 저주파수 영역이 중요하다. Fig. 4와 Fig. 5에서 확인되듯이 저주파수 영역에서는 두 모델의 응답이 일치함을 보이고 있다.

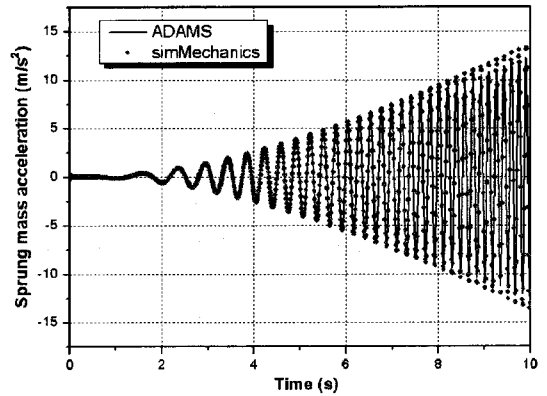


Fig. 4 Sprung mass acceleration

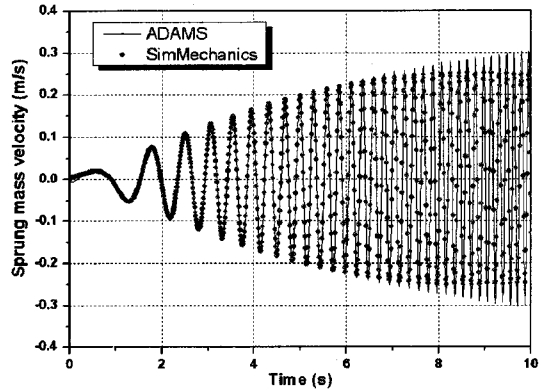


Fig. 5 Sprung mass velocity

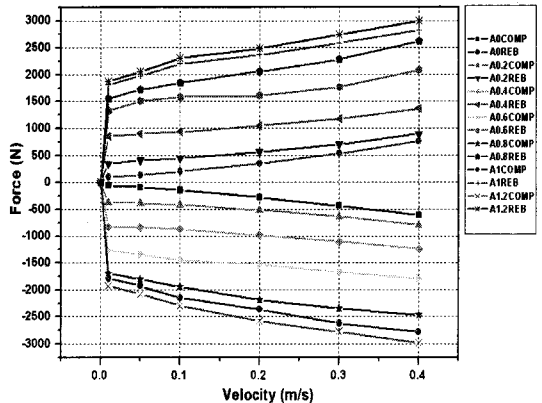


Fig. 6 Force vs. velocity diagram of MR damper

3. MR댐퍼의 감쇠력 선도 및 모델링

3.1 MR 댐퍼의 감쇠력 성능시험

MR댐퍼의 성능 시험은 MTS사의 유압가진기를

Table 2 Look-up table of empirical MR damper model

Current \ Rel. Vel.	0.0 [m/s]	...	0.4 [m/s]
0.0 A	0 [N]	...	600 [N]
0.2 A	0 [N]	...	750 [N]
...
1.2 A	0 [N]	...	3,000 [N]

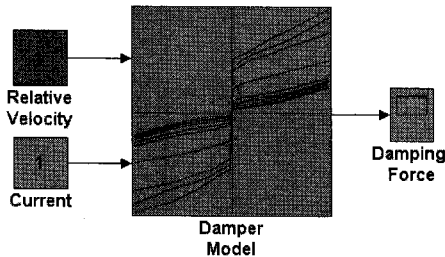


Fig. 7 Empirical MR damper model

통해 기본 감쇠력 시험을 수행하였다. 가진기에 장착된 MR댐퍼에 0.0~0.4 m/s의 속도로 가진을 가하면서, 전류를 0A에서 1.2 A까지 인가하여 데이터를 획득하였다. Fig. 6에 시험을 통해 획득한 MR댐퍼의 감쇠력 선도를 나타내었다.

3.2 MR댐퍼의 모델링

MR댐퍼 모델링은 MR댐퍼의 성능 시험결과를 통해 얻은 감쇠력선도 그래프를 바탕으로 MATLAB/Simulink환경에서 룩-업(look-up) 테이블을 이용하여 모델링 하였다⁽⁶⁾. MR댐퍼의 감쇠력은 피스톤의 속도와 인가전류에 따라 변화한다. 따라서 MR댐퍼의 감쇠력은 식 (2)와 같이 상대속도에서 발생하는 감쇠력과 전류에 의해서 발생하는 감쇠력으로 구성 된다고 볼 수 있다.

$$F_{total} = F_{relativevelocity} + F_{current} \quad (2)$$

MR댐퍼 모델의 구성을 위한 룩-업 테이블의 데이터는 Table 2와 같이 구성하였으며, Fig. 7과 같이 MATLAB/Simulink를 이용하여 모델링 하였다.

4. 현가식 운전석 ECU

4.1 ECU의 구성

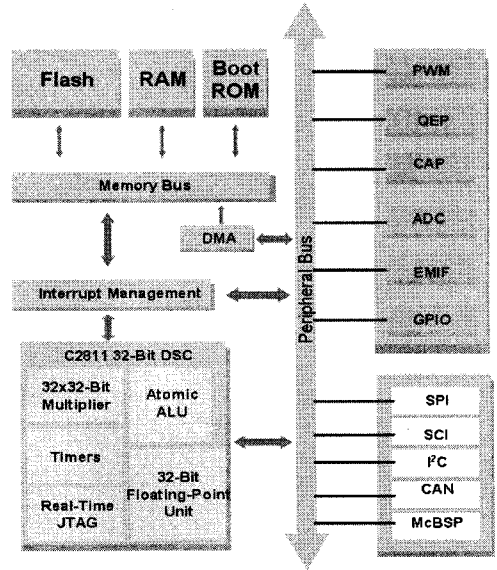


Fig. 8 ECU block diagram

현가식 운전석의 제어용 알고리즘은 고속의 부동 소수점 연산을 필요로 하며, 동시에 센서 및 동작기 등과의 연결을 위한 다양한 입출력 모듈을 필요로 한다. 따라서 이 연구에서는 ECU의 구성을 32비트 TMS320F2811 DSP core를 중심으로 하였다. TMS320F2811의 특징은 32비트의 DSP로서 150 MIPS의 빠른 처리속도를 가지고 있고, 12비트의 A/D변환기, 2개의 SCI 통신, 그리고 can과 SPI 등을 지원한다. 이와 같은 특징을 가지고 있는 TMS320F2811은 고속처리능력, 메모리 크기에서 탁월한 성능을 가진다. Fig. 8은 ECU의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

(1) ECU의 동작과정

현가식 운전석 제어 프로그램은 MR댐퍼의 전류를 제어하기 위한 PWM기능, 각 센서들의 신호를 검출하기 위한 A/D변환기능, 타이머 기능, 입출력 I/O 기능 등을 사용하여 운전석의 진동제어를 매 1ms 마다 수행한다.

제어기로 입력되는 모의센서의 신호는 모두 전압 신호이므로 단위 전압에 대한 물리량으로 변환하는 이득을 곱하여 제어알고리즘에서 사용한다. 또한 고주파 잡음을 제어하기 위해 모의센서 신호로부터 저주파 통과필터를 통해서 입력한다.

스카이-훅 제어를 위해 운전석 상부프레임의 가속도와 상부와 하부프레임 사이의 상대변위는 각각

의 모의센서 신호를 적분기 및 미분기 역할을 하는 디지털 필터를 통과하게 된다.

4.2 현가식 운전석 ECU 개발환경

(1) 하드웨어

Fig. 9는 TMS320F2811 마이크로프로세서에 제

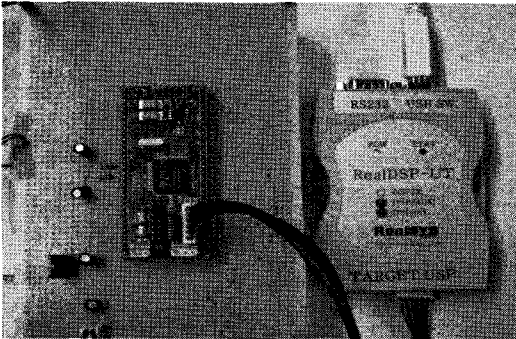


Fig. 9 ECU and RealDSP-UT

어 프로그램을 다운로드와 디버깅할 수 있는 개발도구인 RealDSP-UT Simulator와 ECU를 보인다. RealDSP-UT는 PC와 USB 또는 COM 포트로 접속이 가능하며, COM 포트를 사용하거나 Bluetooth 모듈을 사용하여 무선으로 플래시 프로그램 및 데이터 모니터링도 가능하여 이동체의 제어기 개발에 유용하다. Target DSP와 접속은 TTL 또는 RS232 레벨의 비동기 통신 방식을 사용하여 접속되어 115 Kbps 통신 속도로 접속 사용한다.

(2) 소프트웨어

이 연구에서는 현가식 운전석의 ECU 개발에 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 구현한 ECU 알고리즘을 TI사의 CCS(code composer studio)를 사용한 auto-code generation을 이용해 ECU에 제어를 구현하였다.

시뮬레이션으로부터 32비트 제어기에 적용하는 과정은 다음과 같다.

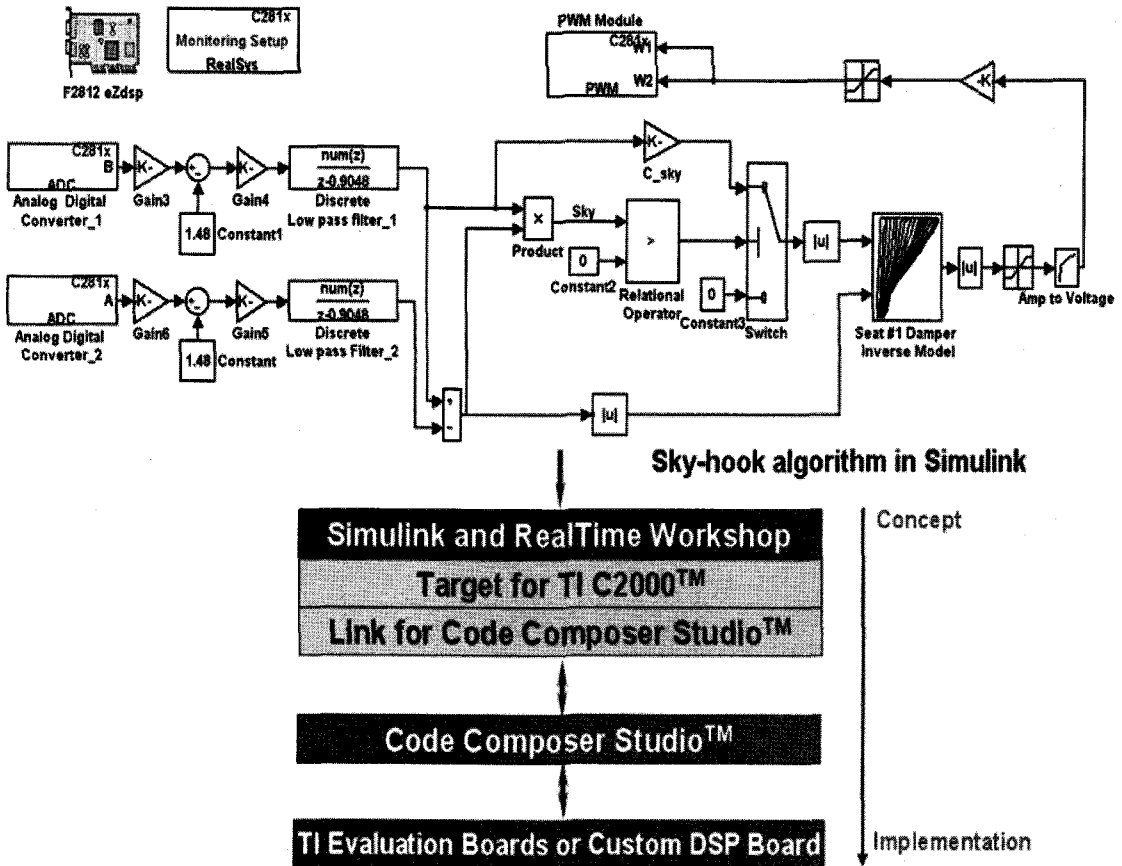


Fig. 10 ECU development process of model based

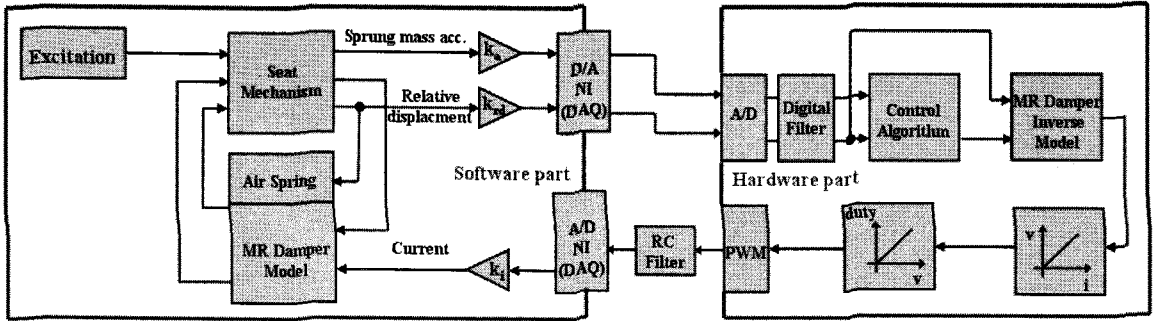


Fig. 12 Schematic layout of the EILS system

Step 1: 제어기를 설계하는 단계로 부동소수점 연산을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 제어기의 연산 성능과 메모리에 관계없이 자유롭게 제어기를 설계할 수 있다.

Step 2: Step 1에서 검증된 제어기 모델을 고정 소수점 연산을 이용하여 시뮬레이션 한다. 제어기의 연산 성능과 변수할당, 변수의 필요정밀도를 고려하여 제어기를 개발한다.

Step 3: 32비트 ECU에 적합한 알고리즘의 C 코드와 시스템 파일들을 생성한다.

Step 4: 32비트 ECU의 I/O를 제어하는 파일들과 제어기 모델에서 생성한 알고리즘 코드와 시스템파일들을 연결하여 컴파일, 링크한 후 32비트 ECU에 다운로드 한다. Fig. 10은 32비트 ECU에 제어 알고리즘이 다운로드되는 과정을 나타낸다.

5. EILS 시스템

현가식 운전석의 ECU를 평가하기 위한 EILS 시스템을 구성하기 위해 MathWorks사의 실시간 시뮬레이션지원 틀인 xPC Target™을 사용하였다. 호스트(host) 컴퓨터에서 만들어진 현가식 운전석의 동역학 수치 모델의 실시간 코드를 타겟(target) 컴퓨터에 다운로드 하면 타겟 컴퓨터에 있는 xPC Target™ Real-time Kernel이 실시간 시뮬레이션 환경을 구축해준다. 호스트 컴퓨터와 타겟 컴퓨터는 빠른 통신을 위하여 TCP/IP를 이용하여 연결하였다. Fig. 11에 실시간 시스템의 간략한 개요를 나타내었다.

5.1 EILS 시스템의 S/W구성

소프트웨어 부분은 2.2절에서 구성한 실시간 현가

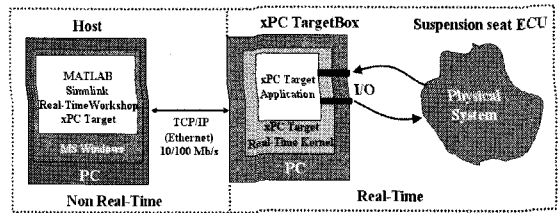


Fig. 11 xPC Target real-time system

식 운전석의 수치 모델과 3.2절에서 모델링한 MR 댐퍼의 모델을 포함하여 MATLAB/Simulink에서 구현하였다. Fig. 12는 EILS시스템의 전반적인 구성을 보여주는 블록선도이다. 현가식 운전석의 수치모델에서 상부가속도와 상대변위가 각각의 게인값 k_a 와 k_{rd} 에 의해 물리량이 아닌 전압신호로 바뀐다. 이 전압 신호는 D/A를 거쳐 ECU로 입력된다.

MR댐퍼 모델에는 현가식 운전석의 수치 모델에서 계산된 상대속도와 ECU의 출력인 전류신호가 A/D를 거쳐 게인값 k_i 에 의해 환산되어 입력된 진동제어를 수행하게 된다.

5.2 EILS 시스템의 H/W구성

Fig. 12의 오른쪽 부분은 ECU의 블록선도를 보여주고 있다 현가식 시트의 수치모델로부터 받은 상부 가속도와 상대변위를 A/D를 거쳐 각각 디지털 적분 필터와 미분필터를 통과해 현가식 운전석의 스프링 상부 속도와 상, 하부 사이의 상대 속도를 계산한다. 이들 신호는 스카이-훅 알고리즘에 의해 제어에 필요한 감쇠력을 계산하고, MR댐퍼 역모델에 의해서 필요한 전류를 계산하게 된다. 계산된 전류는 전압으로 변환되고, 다시 PWM duty비로 계산이 되어 ECU에서 출력 된다. 출력된 PWM신호는 RC필터와 전류 제어기를 통하여 현가식 운전석의 수치모델로



Fig. 13 EILS system for ECU performance evaluation

래환(feed back)시킨다.

Fig. 13은 현가식 운전석 ECU의 성능을 평가하기 위한 EILS시스템을 나타낸 것이다. 호스트 PC와 xPC target box의 통신을 위하여 LAN을 사용하였고 ECU에서 발생한 전류가 흐를 수 있도록 실제 MR댐퍼의 코일을 이용하였다.

6. 시험결과

6.1 단위입력 가진

이 연구에서 구축한 EILS 시스템과 현가식 운전석의 ECU 성능분석을 위하여 현가식 운전석의 동역학 모델에 단위입력(step input)과 스위치입력(sweep input), 그리고 범프입력(bump input)을 가하여 제어 알고리즘에 따른 현가식 운전석의 성능을 평가하였다. ECU의 동작상태를 알기 위하여 현가식 운전석 베이스에 스텝입력을 가하였다. 입력의 크기는 1cm 이고 5초에서 가진을 가하였다.

Fig. 14는 제어 명령 신호에 따른 전류의 발생을 나타낸 그래프이다. 제어 명령신호에 따라서 제어전류의 발생이 잘 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

6.2 스카이-훅 제어의 최적 감쇠계수 선정

현가식 운전석의 제어기에는 스카이-훅 제어알고리즘을 사용하였다. 스카이-훅 알고리즘은 1974년 Karnopp⁽⁷⁾이 제안하였으며, 가상의 관성기준(inertial reference)과 질량 사이에 가상적인 수동 댐퍼를 장착하여 진동을 제어하는 방식이다. 여기서 수동 댐퍼의 감쇠계수를 C-sky라고 명하였고, MR

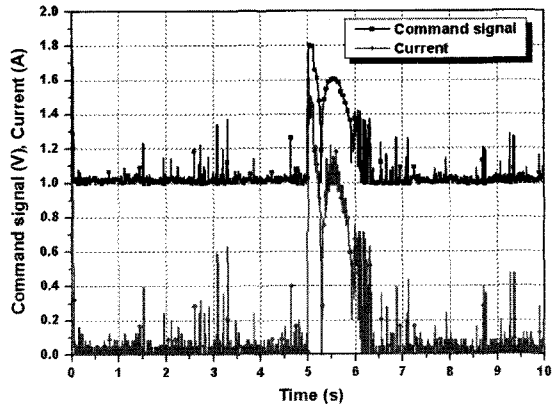


Fig. 14 ECU response for the step input

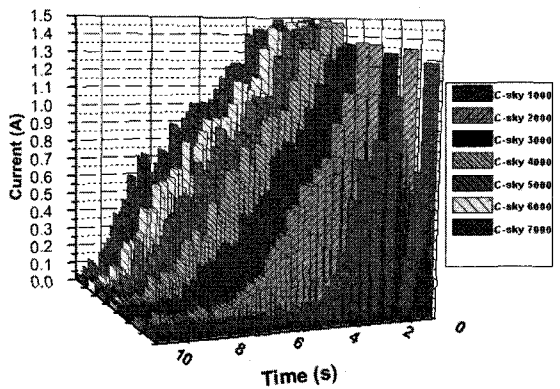


Fig. 15 Control current curves of ECU

댐퍼를 이용한 반능동 현가장치에서 가변되는 제어 감쇠력은 C-sky값과 시스템의 질량속도의 곱으로 나타낼 수 있으므로 C-sky값을 선정하는 것이 아주 중요하다. C-sky값이 과도하게 크면 에너지의 소비가 많고 오히려 승차감이 나빠질 수가 있고 반대로 C-sky값이 너무 작으면 제어성능을 제대로 발휘할 수 없게 된다. 이 연구에서는 현가식 운전석에 스위치 가진을 입력으로 하여 여러 가지 C-sky값에 대한 제어성능과 그때의 에너지 소비율을 확인하여 가장 적절한 C-sky값을 선정하였다. Fig. 15는 C-sky값을 1,000~7,000까지 변화시킬 때 스위치 입력에 따른 반능동현가식 운전석의 ECU가 소비하는 전류의 양을 나타낸 그래프이다. 전류 곡선의 아랫부분의 면적을 구하면 각각의 C-sky값에 따른 사용 전류의 양을 알 수가 있다.

이 연구에서 사용한 MR댐퍼의 저항은 4.5Ω이며 소비전력은 $P=I^2R$ 이므로 사용전류가 많을수록 소비

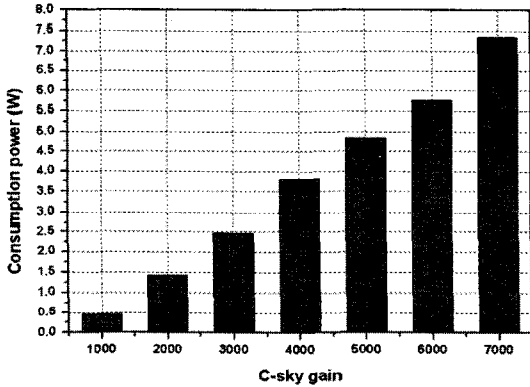


Fig. 16 Consumption power. Of MR damper coil

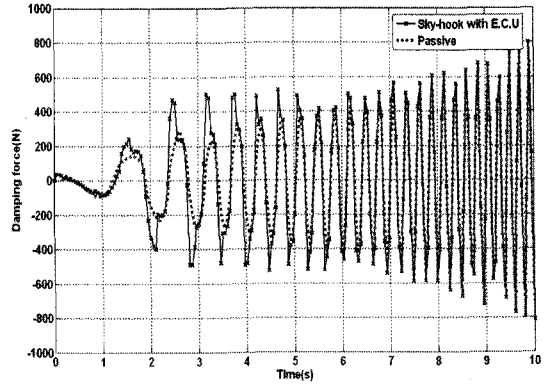


Fig. 18 Damping force curve

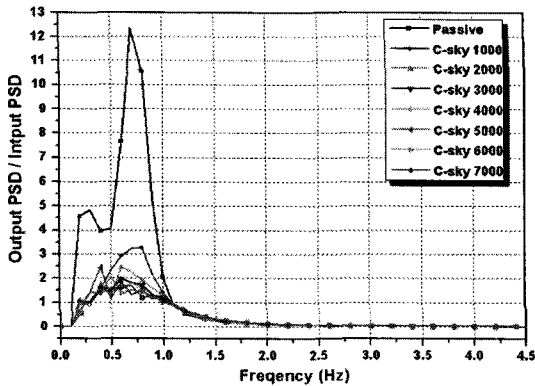


Fig. 17 Vertical acceleration PSD curve

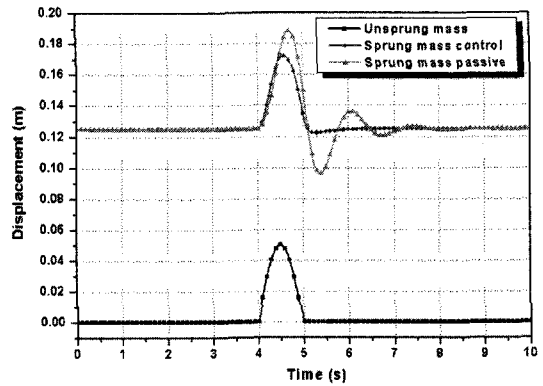


Fig. 19 Response of bump excitation

소비전력이 많아진다. Fig. 16은 각각의 C-sky 값에 따른 분당 소비전력을 나타내고 있다. 그래프에서 보듯이 C-sky값이 커짐에 따라 소비전력이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 전류가 커지면 열 발생도 많아 효율이 낮아지는 단점이 있다.

Fig. 17은 각각의 C-sky값에 따른 스프링 상부질량의 가속도와 하부질량 입력가속도의 PSD (power spectral density)비를 나타낸 그래프이다. PSD비는 승차감과 직결이 되므로 현가장치의 성능을 나타낼 때 많이 사용된다. 비의 크기가 클수록 승차감이 좋지 못한 것으로 평가할 수 있다. 그래프에서 나타나듯이 PSD의 입력 대 출력 비가 공진영역(0.75 Hz)에서 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, C-sky값이 3,000일 때 그 비가 적어지는 효과가 한계에 도달하였음을 알 수 있다.

따라서 소비전력이 적으면서도 제어성능을 낼 수 있는 C-sky값을 3,000으로 결정하였다.

Fig. 18은 스카이-훅 제어를 할 경우와 일반 수동

댐퍼일 경우의 스위치간에 대한 감쇠력을 나타낸 그래프이다. 공진영역에서는 제어를 하는 경우가 하지 않는 경우보다 감쇠력이 많이 발생하였고, 높은 주파수로 갈수록 제어하는 경우와 그렇지 않은 경우의 감쇠력이 같아지는 것을 확인할 수 있으므로 주어진 제어알고리즘에 잘 따르고 있는 것을 알 수 있다.

6.3 범프입력 가진

Fig. 19는 현가식 운전석에 범프입력을 주었을 때 ECU를 가지는 반능동 제어운전석과 수동형 운전석의 입력 변위에 대한 스프링 위 질량중심의 변위를 나타낸 그래프이다. 변위가 첫 번째 피크(peak)에서 약 20%정도 감소하는 효과를 나타내었고, 두 번째 피크에서는 약 95% 변위 감소 성능을 나타내었다.

7. 결 론

이 연구에서는 MR댐퍼를 가지는 반능동 현가식

운전석의 ECU의 제어상황에 따른 제어동작의 성능 평가를 EILS기법을 이용하여 수행하였고, 수동형 현가식 운전석에 비하여 다양한 노면 가진에 대한 진동저감 성능을 향상시켰다. EILS 시스템을 구성하기 위하여 MathWorks사의 xPC target을 이용하였으며, SimMechanics를 이용해 현가식 운전석의 실시간 동역학 모델을 구성하고 검증하였다. 그리고 모델 기반을 바탕으로 ECU의 알고리즘을 시뮬레이션할 수 있는 환경을 개발하였다. 이와 같이 구축된 ECU 평가 시스템은 개발된 ECU의 성능평가를 다양한 조건에서 쉽고 빠르게 검증할 수 있다.

후 기

“이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2006-065)”

참 고 문 헌

(1) Stein, G. J. 1997, “A Driver’s Seat with Suspension of Elector Pneumatic Type”, *Journal of Vibration & Acoustics-Transactions of the ASME*, Vol. 119, No. 2. pp. 230~235.

(2) Griffin, M. J., 1978, “The Evaluation of

Vehicle Vibration and Seats”, *Applied Ergonomics*, Vol. 9, pp. 15~21.

(3) Pukyong National University, 2006, “High-performance Suspension Technology Development for A Driver’s Seat of Commercial Vehicles”, Ministry of Commerce, Industry and Energy, Final Report.

(4) Misselhorn, W. E., Theron, N. J. and Els, P. S., 2006, “Investigation of Hardware-in-the-loop for Use in Suspension Development”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, No. 1, pp. 65~81.

(5) Rieger, K. J. and Schiehlen, W., 1994, “Active Versus Passive Control of Vehicle Suspensions Hardware-in-the-loop Experiments”, *The Active Control of Vibration, Proceedings of the IUTAM Symposium*, pp. 93~100.

(6) Choi, S. B., Lee, S. K., Park, Y. P., 2001, “A Hysteresis Model for the Field-dependant Damping force of a Magnetorheological Damper”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, No. 2, pp. 375~383.

(7) Karnopp, D., Crosby, M. and R. A. Harwood, 1974, “Vibration Control Using Semi-active Suspension Control”, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, pp. 619~626.