

# Hardware-in-the Loop Simulation 을 통한 차간거리 제어시스템의 제어 성능 연구

이 찬 규<sup>†</sup> · 이 경 수<sup>\*</sup>

(2001년 11월 20일 접수, 2002년 4월 23일 심사완료)

## An Investigation of Vehicle-to-Vehicle Distance Control Laws Using Hardware-in-the Loop Simulation

Chankyoo Lee and Kyongsu Yi

**Key Words :** Intelligent Cruise Control(지능형 순항 제어), CAN(Controller Area Network), 차간거리 제어(Vehicle-to-Vehicle Distance Control), Stop and Go Cruise Control(정지/서행 순항 제어), HiLS(Hardware-in-the Loop Simulation)

### Abstract

This paper represents an investigation of the vehicle-to-vehicle distance control system using Hardware-in-the-Loop Simulation(HiLS). Control logic is primarily developed and tested with a specially equipped test vehicle. Establishment of an efficient and low cost development tool is a very important issue, and test vehicle approach is costly and time consuming. HiLS method is useful in the investigation of driver assistance and active safety systems. The HiLS system consists of a stepper motor for throttle control, a hydraulic brake system with an electronic vacuum booster, an electronic controller unit, a data logging computer which are used to save vehicle states and signals of actuator through a CAN and a simulation computer using mathematical vehicle model. Adaptation of a CAN instead of RS-232 Serial Interface for communication is a trend in the automotive industry. Since this environment is the same as a test vehicle, a control logic verified in laboratory can be easily transferred to a test vehicle.

### 기호설명

- $t_k$  : 헤드웨이 타임
- $d_o$  : 헤드웨이 오프셋
- $d_h$  : 헤드웨이 거리
- $d_r$  : 상대 거리
- $d_{offset}$  : 오프셋 거리
- $v_p$  : 선행 차량 속도

### 1. 서론

차간 거리 제어 시스템이 아직까지 상용화된

사례는 없으나 세계의 일부 선형 연구단체나 미국, 일본 및 유럽의 각종 자동차 회사에서 활발히 연구가 진행되고 있으며 이미 PATH(The Partners for Advanced Transit and Highways), VERTIS(The Vehicle, Road and Traffic Intelligent Society) 등 각종 ITS(Intelligent Transport Systems) 연구단체가 많은 연구를 수행하였다.<sup>(1-5)</sup> 또한 정지를 포함하는 저속에서의 차간거리 제어 성능이 뛰어난 정지/서행 순항 제어 시스템을 위한 제어기 설계 및 센서 설계에 관한 연구도 진행되고 있는 상태이다.<sup>(1)(6)</sup>

일반적으로 차간 거리 제어 시스템의 개발을 위해서는 실차 실험이 반드시 수반되어야 한다. 그러나 실차 실험은 많은 비용과 시간을 요하며 또한 실험자가 위험에 처할 수 있는 경우가 생길 수 있다. 따라서 대부분의 연구는 실험실 내에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 진행되고 있으며 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션의 단점을 보완할 수 있

<sup>†</sup> 책임심사, 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과  
E-mail : mralone@orgio.net  
TEL : (02)2281-7194 FAX : (02)2298-4634

<sup>\*</sup> 한양대학교 기계공학부

는 HiLS(Hardware-in-the Loop Simulation) 시스템이 적용되고 있다. HiLS 시스템은 시뮬레이션 수행시 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 부분이나 모델링이 어려운 복잡한 하드웨어를 시뮬레이션 루프 안에 포함시킴으로써 시뮬레이션의 신뢰성을 향상시킬 수가 있다. 또한 동일 부품 및 실시간 시뮬레이션을 통해 실차에 바로 적용할 수 있는 단계까지 제어시스템의 개발이 가능하므로 시간과 비용을 줄이는 효과가 있다. 이미 국내에서는 이한주 등이 PC를 이용한 ABS/TCS HiL 시뮬레이터를 개발하였으며<sup>(8)</sup> 국외로는 Deborah 이 Real Time 기반 DEC VAX Station II를 개발하였고,<sup>(9)</sup> Jun Cheng은 80196 과 PC의 인터페이스를 이용한 차량 제어 시스템을 개발하였다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서 개발한 차간 거리 제어 시스템은 선행 차량의 속도와 자차와의 상대거리를 통하여 적절한 안전거리와 속도를 유지하도록 내차의 스로틀 및 브레이크를 제어하게 된다. 따라서 스로틀 및 브레이크 액추에이터의 모델링이 필요하게 되는데, 특히 브레이크 액추에이터의 경우 비선형적인 특성이 매우 강하므로 모델링에 어려움이 있게 되고 시뮬레이션과 실제 시스템은 많은 오차를 동반하게 된다.<sup>(7)</sup> 따라서 실제의 스로틀 및 브레이크 액추에이터, 브레이크 시스템, 센서 및 ECU를 통해 시뮬레이션을 수행함으로써 HiLS의 구축은 의의가 있다. 또한 현재 자동차 네트워크의 표준으로 자리잡고 있는 CAN을 사용하여 실험차량과 동일한 네트워크를 구성하였다. 따라서 각종 데이터 수집이 용이하며 실제 차량과 동일한 제어 코드를 사용할 수 있어 효율적인 제어 시스템의 개발이 용이하다.

국내에서 슬라이딩 모드를 이용한 차간 거리 제어시스템이 연구되고 있지만<sup>(10)</sup> 본 연구에서는 LQ(Linear Quadratic) 최적 제어 이론을 기반으로 한 속도 및 거리 제어 알고리즘으로 차간거리 제어 시스템의 알고리즘을 구성하였다. 이 알고리즘에 따라 ECU가 스로틀/브레이크 액추에이터를 제어하게 된다.

## 2. 차간거리 제어 HiLS 시스템

### 2.1 HiLS 시스템의 구성

HiLS 시스템은 스로틀 및 브레이크 액추에이터, ECU, 데이터 수집을 위한 컴퓨터 및 차량 시뮬레이션을 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. ECU는 앞차의 속도 및 거리 상황을 가상적으로 설정하게

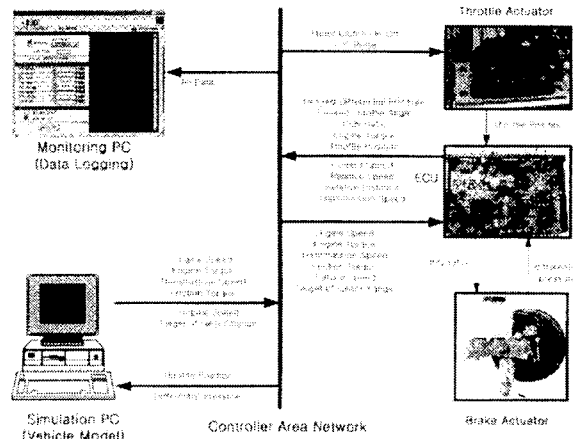


Fig. 1 Schematic of HiLS system

되고 센서로부터 입력된 정보로부터 주행 제어 알고리즘을 통하여 스로틀 및 브레이크 액추에이터에 제어 신호를 보내게 된다. 실제로 실험용 차량에서 ECU는 50msec의 주기로 CAN을 통하여 신호를 입력 받으며 센서로부터 10msec 간격으로 신호를 받아들인다. 시뮬레이션 컴퓨터는 스로틀 개도각과 브레이크의 차압 신호를 입력 받아 10msec의 주기로 수학적 차량 모델로부터 실차에서 나오는 EMS, TCU 신호 및 각종 차량 상태값을 계산하게 된다. ECU로부터 계산된 스로틀 개도의 제어 및 시뮬레이션 컴퓨터에서 계산된 차량의 각종 변수의 전달을 위해서 CAN을 이용한다. 데이터를 저장하는 컴퓨터는 50msec의 주기로 차량의 상태 정보와 컨트롤 유닛의 제어 로직과 관련된 정보 등 CAN에 연결되어 있는 모든 유닛의 정보들을 저장하게 된다. Fig. 1은 HiLS 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

### 2.2 스로틀 액추에이터

컨트롤러 유닛에서 제어 로직에 따라 계산된 가속도를 추종하기 위해서 스로틀 개도각의 제어가 필요하게 된다. 본 연구에서는 ECU에서 목표 스로틀 개도각을 스테퍼 모터의 펄스로 환산하여 CA를 통하여 TVC(Throttle Valve Controller)에 보내고 TVC는 목표 스로틀 개도각을 추종하기 위해서 스테퍼 모터를 제어하게 된다. TVC에 의해 제어되는 스로틀 개도각의 분해능은 0.075도이며 TVC는 ECU로부터 받은 펄스에 맞는 스로틀 각을 유지하기 위하여 자체 내장된 컨트롤 로직에 따라 작동하게 된다. 또한 False Safe 기능이 내장되어 있어서 오류 발생시 오류 신호를 송출하며 복원 스프링에 의해 즉시 스로틀 밸브를 닫게 된다. 또한 실제 차량에 설치되어 있는 것과 동일한 스로틀 바디 및 TPS(Throttle Position Sensor)를 설치

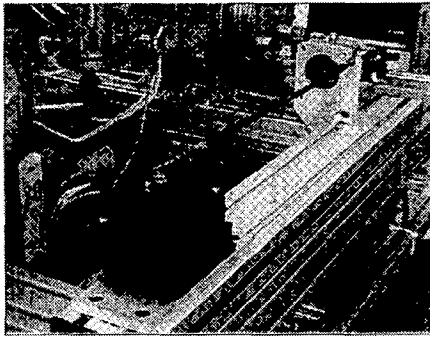


Fig. 2 Throttle actuator

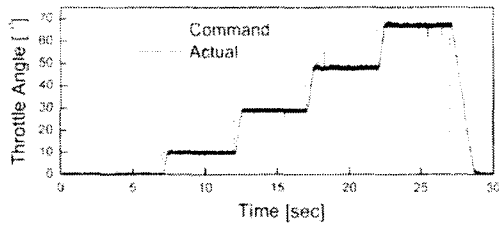


Fig. 3 Response of throttle actuator

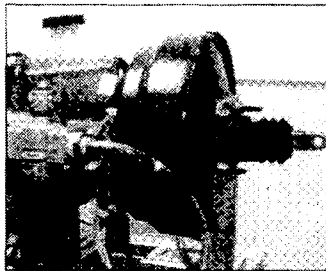


Fig. 4 Electronic vacuum booster

하여 ECU 에서 쓰로틀 개도각을 전달받아 목표값을 추종하게 된다. Fig. 2 는 쓰로틀 액추에이터 및 쓰로틀 바디의 사진을 나타낸 것이며 Fig. 3 은 쓰로틀 액추에이터의 작동 성능을 나타낸 것이다.

### 2.3 브레이크 액추에이터

컨트롤러 유닛의 제어 로직에서 계산된 감속도에 따라 ECU 가 PWM(Pulse With Modulation) 신호를 EVB(Electronic Vacuum Booster)의 솔레노이드 밸브에 보내게 되고 PWM 신호의 듀티율에 따라 부스터의 진공 챔버와 대기 챔버 사이에 차압이 조절된다. 형성된 차압은 브레이크의 마스터 실린더에 힘을 가하게 되고 마스터 실린더를 거쳐 압력의 증폭이 이루어짐에 따라 제동력이 발생한다. 실차에서는 브레이크 진공 챔버와 엔진 매니폴드(Intake Manifold)가 연결되어 있어 진공챔버에 진공이 형성되지만, HLS 에서는 진공펌프를 이용하여 엔진 매니폴드와 비슷한 진공을 만들게 된다. 또한 유압 센서를 브레이크 라인에 장착하여 실제

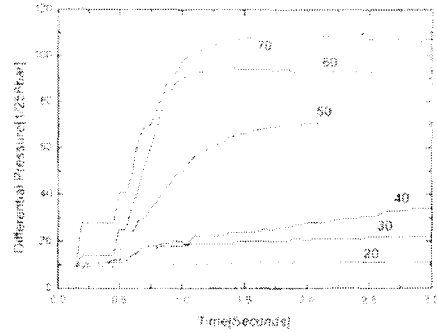


Fig. 5 Step response of EVB

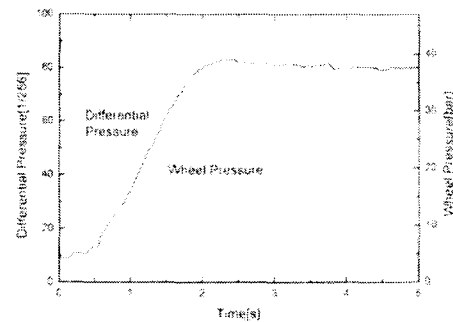


Fig. 6 Pressure response of brake line

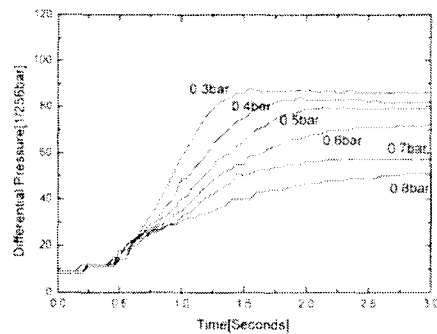


Fig. 7 Step response of EVB under the change of vacuum pressure

형성되는 브레이크 라인 압력을 측정할 수 있도록 하였고, 실차와 동일한 브레이크 시스템 및 동일한 길이의 브레이크 라인을 장착하였다.

Fig. 5 는 듀티율의 스텝 입력에 따른 부스터의 진공챔버와 대기챔버 사이의 차압의 형성과정을 비교한 것이다. Fig. 6 은 듀티율이 50%의 스텝 입력일 때 부스터의 차압의 형성에 따른 브레이크 라인의 압력 형성 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 7 은 듀티율 50%일 때 진공압에 따른 차압의 생성 과정을 나타낸 것이다.

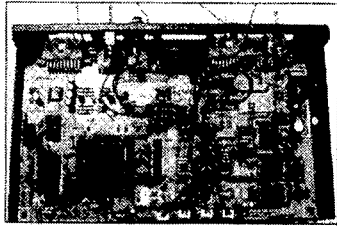


Fig. 8 ECU

2.4 ECU

ECU는 한 개의 Siemens C167 CPU를 가지고 있어서, 센서의 AD 변환을 쉽게 할 수 있고, CAN으로의 접속이 용이하다. 또한 EVB의 PWM 솔레노이드를 구동할 수 있으며 각종 램프 및 LED의 제어가 용이하다. 또한 ECU는 Flash ROM, RAM을 가지고 있어서 직렬통신을 통해 PC로부터 제어 로직을 쉽게 메모리로 다운로드 할 수 있다. Fig. 8은 ECU의 사진을 나타낸 것이다.

3. 차간거리 제어 알고리즘

3.1 차간거리 제어 알고리즘의 구성

쓰로틀과 브레이크 액츄에이터를 제어함으로써 앞차와의 적절한 차간 거리를 유지하는 차간거리 제어 시스템의 알고리즘은 속도제어 알고리즘과 거리 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 대부분의 차량 주행 제어 시스템은 토크 컨버터의 펌프축과 터빈축의 속도가 같은 고속 주행 상황을 위해 개발되었다. 그러나 본 연구에서는 시내 주행 시 또는 차량 정체 시 야기되는 정지/서행 상황에서 발생하는 토크 컨버터의 속도비가 큰 영역까지 고려하였다.

일반적으로 헤드웨이 타임은 앞차와의 상대 거리를 자차의 속도로 나눈 것을 말하며 이 값은 자차의 속도에 따라서 변하게 된다. 그러나 본 연구에서는 헤드웨이 타임을 상수로 고정 시킴으로써 선행차량과의 상대속도를 입력 받아서 헤드웨이 거리를 계산하게 된다. 헤드웨이 거리는 식 (1)과 같이 선행차량의 속도와 헤드웨이 시간의 곱에 헤드웨이 거리 옵션을 더한 값으로 정의된다.

$$d_h = v_p t_h + d_0 \tag{1}$$

따라서 상대 속도, 헤드웨이 거리 및 안전을 위한 거리 옵션에 따라 속도 제어와 거리 제어 알고리즘으로 나누어지게 된다. Fig. 9는 차간거리 제어 시스템의 알고리즘을 나타낸 것이다.

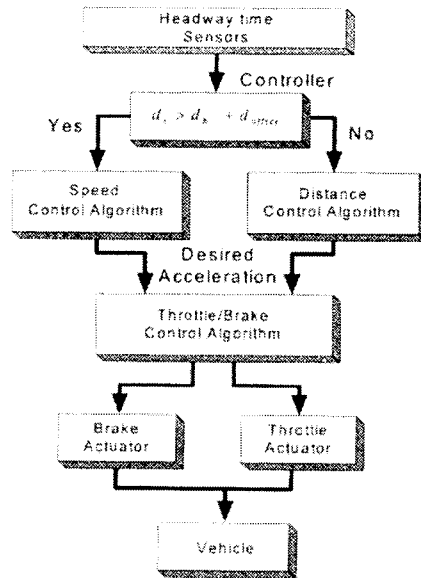


Fig. 9 Schematic of vehicle-to-vehicle distance control system

If  $d_r > d_h + d_{offset}$  "speed control"  
Else "distance control"

3.2 속도 제어 (Speed control)

차선 변경을 하거나 최초로 시스템을 작동 시킬 경우, 앞 차가 없거나 앞차와의 상대 거리 안전거리보다 크게 되므로 제어기는 상대 거리를 줄이기 위해서 급격한 가속을 하게 된다. 따라서 승차감이 나빠지게 되고 많은 연료를 소모하게 될 수 있으며 급격한 가속 시 앞차가 끼어 들거나 급격한 감속을 할 때 승차자가 위험한 상황에 처할 수가 있다. 따라서 이와 같은 현상을 막기 위해서 속도 제어를 하게 된다. 속도 제어 시 설정되는 속도는 식 (3)과 같이 선행 차량의 속도보다 속도 옵션만큼 큰 속도로 설정한다. 목표 감속도는 식 (2)와 같이 설정 속도와 자차의 속도차에 비례하여 결정되게 된다.

$$a_{des} = K(v_{set} - v_{controlled}) \tag{2}$$

$$v_{set} = v_f + v_{offset} \tag{3}$$

3.3 거리 제어(Distance Control)

거리 제어를 위해 LQ 최적 제어 이론을 도입하기 위해 식 (6)과 같이 상태 방정식을 나타내었다.

$$x_1 = d_h - d_r, \quad x_2 = v_r \tag{4}$$

$$u = a_{ic}, \quad w = a_p \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} t_h \\ 1 \end{bmatrix} w \tag{6}$$

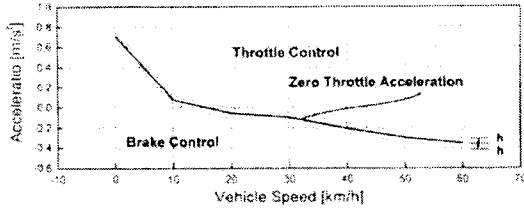


Fig. 10 Throttle/Brake switching logic

여기서  $v_r$  은 상대속도,  $v_c$  는 제어하는 차량의 속도,  $a_{cc}$  는 제어하는 차량의 감가속도를 나타낸다. 또한 식 (7)과 같이 성능 지수를 정의할 수 있고, 승차감과 추종 성능 사이에서 많은 실험을 통해서 식 (8)의 적절한 값을 설정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (7)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix}, \quad R = [r] \quad (8)$$

$$a_{cc} = -Kx = -k_1(d_b - d_r) - k_2 v_r \quad (9)$$

따라서 성능 지수로부터 상대속도, 거리 오차 및 내차의 감가속도를 최소화하도록 최적 계인을 구하게 되고 식 (9)에 나타낸 바와 같이 최적의 감가속도가 결정된다.

또한 승차감 향상을 위해서 식 (11)과 같이 최대의 감가속도를 제한하고 식 (10)과 같은 2 차 필터를 통하여 목표 가속도를 얻게 된다. 따라서 결정된 감가속도는 쓰로틀 및 브레이크 액츄에이터를 통해 거리 제어를 하게 된다.

$$\frac{a_{des}}{u_{sat}} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta \cdot \omega \cdot s + \omega^2} \quad (10)$$

$$u_{sat} = sat(u) = \begin{cases} u_{max} & \text{if } u \geq u_{max} \\ u & \text{if } u_{min} < u < u_{max} \\ u_{min} & \text{if } u \leq u_{min} \end{cases} \quad (11)$$

### 3.4 쓰로틀/브레이크 전환 논리

거리 및 속도 제어 알고리즘에서 목표 감가속도가 나오면  $0.05 m/sec^2$  의 이력현상 범위 내에서는 쓰로틀/브레이크 전환을 하지 않고 그 범위를 벗어났을 때는 쓰로틀이나 브레이크 제어를 판단하게 된다.<sup>(11)</sup> Fig.10 은 현재 속도에 따른 쓰로틀/브레이크 전환 곡선을 나타낸 것이다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 실험 조건 설정

HiLS 의 성능을 확인하고 제어 로직의 성능을 검증하기 위해서 실차 실험, HiLS 및 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 HiLS 플 통하여 쓰로틀 및 브레이크 액츄에이터의 성능을 검증하였다. 실제 차량과 HiLS 의 유사성을 검증하기 위해서 실차 실험과 같은 제어 로직 및 코드, 최적 제어 게인 값, 진공압 등 조건을 동일하게 주었다. 실험 상황은 자차가 약 15km/h 로 진행시 10m 앞에서 10km/h 의 속도를 가진 선행 차량이 나타났다가 15 초 후 사라지게 되므로 자차가 감속하게 된다. 이 설정으로 브레이크 시스템의 성능을 시험할 수 있다. 이후 다른 차가 약 15m 앞에서 20km/h 의 속도로 나타나서 주행을 하게 되므로 자차가 가속을 하게 되어 적절한 안전거리를 유지하면서 주행하게 된다. 이 실험을 통하여 쓰로틀 액츄에이터의 성능을 시험할 수 있다. 헤드웨이 시간(headway time)은 1.2 초로 설정하였고, 헤드웨이 옵셋 거리는 2m 로 설정하였다.

### 4.2 실차 실험 결과

실차에는 ECU, 쓰로틀 및 브레이크 액츄에이터, 데이터 수집용 컴퓨터가 장착되어 있다. 또한 레이더 센서가 장착되어 있어서 앞차와의 상대 거리를 알 수 있지만 본 연구에서는 알고리즘의 성능 분석을 위해서 앞차와의 정확한 상대 거리 및 상대 속도 정보가 필요하므로 레이더 센서의 정보를 이용하지 않는다. 따라서 가상 차량의 속도 프로파일을 ECU 에서 제공하게 함으로써 앞차와의 상대 속도 및 상대 거리를 계산하였다. 운전자가 단지 차간거리 제어 시스템 ECU 의 작동 스위치를 ON 으로 작동 시킴으로써 ECU 는 차간 거리 제어 알고리즘에 따라 계산된 목표 감가속도를 추종하기 위해 운전자의 아무런 조작 없이 쓰로틀 및 브레이크 액츄에이터를 제어함으로써 자율 주행을 가능케 하였다.

Fig. 11 은 실제 차량에 차간거리 제어 알고리즘을 적용한 결과이다. 초기에 앞차와의 상대 거리를 줄이기 위해서 거리 제어 로직에 따라 브레이크 액츄에이터가 작동하게 되고, 이후 갑자기 나타나는 차량에 대해 속도제어로 전환하여 속도차를 줄인 후 다시 거리 제어로 전환하게 된다. 이 과정에서 쓰로틀/브레이크 액츄에이터 적절하게 작동하게 된다. 전 영역에 걸쳐서 목표 감가속도를 추종하는 것을 볼 수 있으나 브레이크 액츄에이터가 작동하는 부분에서는 브레이크 액츄에이터의 응답 속도가 느리므로 실제 감속도가 약간씩 지연되어서 나타나는 것을 볼 수 있다.

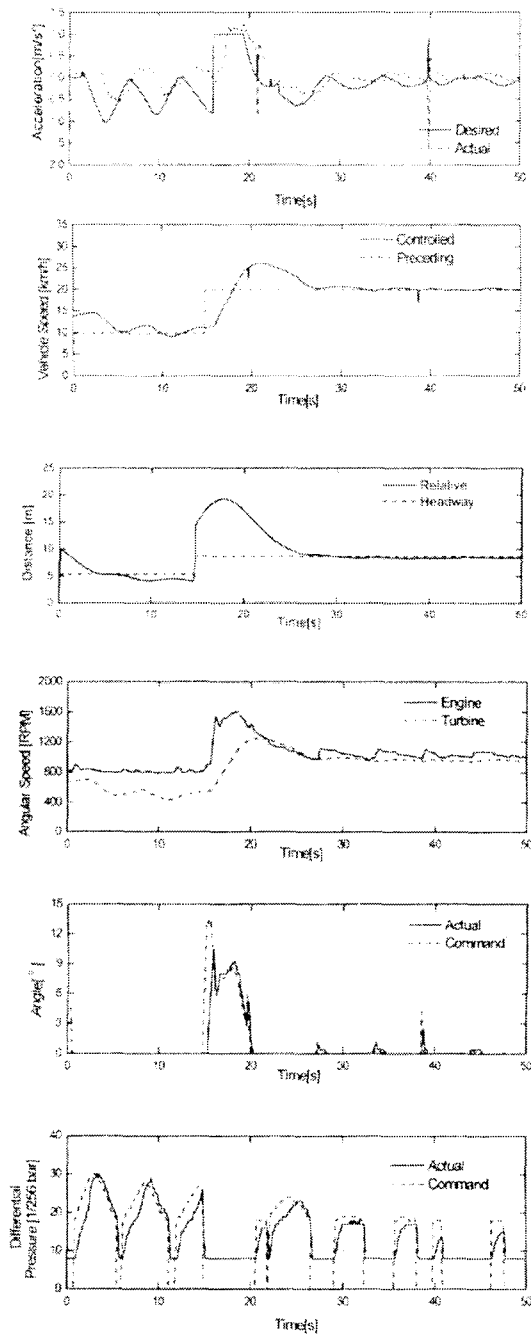


Fig. 11 Experiment results of test vehicle

4.3 HiLS 결과

Fig. 12 는 HiLS 를 이용한 실험 결과를 나타낸 것이다. 상대 거리 및 쓰로틀 개폐의 경향 및 차압 형성의 경향이 실차와 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

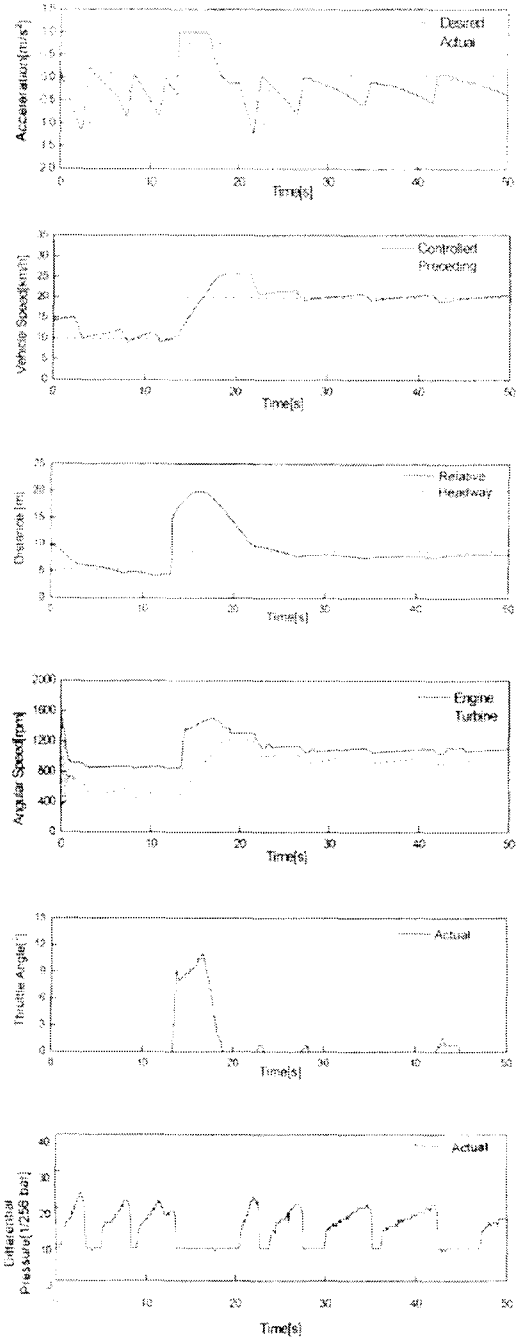


Fig. 12 HiLS results

4.4 시뮬레이션 결과

Fig. 13 은 가상의 컨트롤러와 수학적 차량 모델을 Matlab Simulink 로 구성한 순수한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 실차와 유사한 결과를 보이지만 브레이크 액츄에이터의 비선형적 특성으로 인해 차압의 형성이 실차 실험과 차이가 있다. 또한 쓰로틀 각이 지속적으로 계속 열려 있는 것을 볼 수 있다.

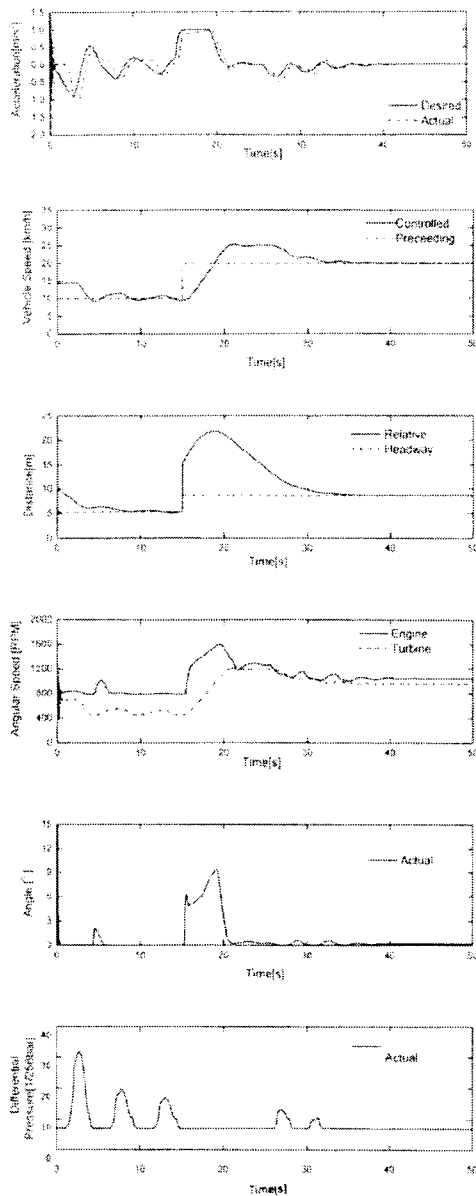


Fig. 13 Simulation results for a low-speed control situation with cut-out vehicle

## 5. 결론

본 연구에서는 차간 거리 제어 시스템의 효율적인 개발을 위하여 실험용 차량에 장착된 동일한 브레이크 시스템 및 스로틀 바디, 스로틀/브레이크 액추에이터, ECU 및 센서를 가진 HiLS 시스템을 개발하였다. 또한 실제 차량에서 사용중인 CAN을 기반으로 네트워크를 구성하였기 때문에 실험실에서 제어 로직을 실시간으로 테스트하고 검증함으로써, 개발된 제어 로직을 실제 차량에 바로 이식할 수 있는 효율적인 개발 환경을 구축하였다.

HiLS 실험 결과 순수 시뮬레이션보다 실제 차량에 가까운 실험 결과를 얻을 수 있었다. 또한 가상의 프로파일로 입력하는 선행차량의 속도로부터 자차와의 상대거리 및 속도를 수학적 차량모델로부터 실시간으로 계산하였다. 따라서 최적의 감가속도 설정 알고리즘, 스로틀/브레이크 전환 알고리즘 및 스로틀/브레이크 제어 알고리즘을 효율적으로 개발하여 실차와 유사한 실험 결과를 얻었다.

## 후 기

이 연구는 2001년 한양대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Prestl, W., 2000, "The BMW Active Cruise Control ACC," SAE paper No. 20000344.
- (2) Winner, H., Witte, S., Uhler, W. and Lichtenberg, B., 1996, "Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends," SAE paper No. 961010.
- (3) Jun Cheng, Ji-Bo Cui, Guang-Hui Xu 2000, "The Integrated Development System for an Electronic Control System," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, June 12-15, 2000, Seoul, Korea, paper No. F2000A088.
- (4) Choi, S. and Devlin, P., 1995, "Throttle and Brake Combined Control for Intelligent Vehicle Highway Systems," SAE paper No. 951897.
- (5) Maciuga, D.B. 1997, "Nonlinear Robust Control with Application to Brake Control for Automated Highway Systems," Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA.
- (6) Paul Venhovens, Karl Naab and Bartono Adiprasito, 2000, "Stop and Go Cruise Control," Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, June 12-15, 2000, Seoul, Korea, paper no. F20001396.
- (7) Yi, K. and Lee, S., 2000, "Modeling and Control of an Electronic-Vacuum Booster for Vehicle-to-Vehicle Distance Control", AVEC 2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, August 22-24, 2000, Ann Arbor, Michigan, AVEC #29.
- (8) Yi, H., Park, Y., Seo, M., Seok, C., Yi, S., "A Development of ABS/TCS HiLS," *Proceedings of KSAE*, Autumn, 2000, Vol 2, pp. 858-863.
- (9) Deborah Kempf, Loren Bonderson, Leren Slafer, "Real Time Simulation for Application to ABS Development.," SAE paper 870336.
- (10) Yi, D., Jang K., 2000, "A Study of Automatic Vehicle Clearance Control Algorithm Using the Slide Mode Control," KSAE paper Vol.8, No.2, pp. 92-101.
- (11) Song, J., 1998, "A Development of TCS Slip Control Algorithm Based on Engine Map," *Trans. of the KSME*, Vol. 22, No. 2, pp. 428-436.