

차간거리제어 **Hardware-in-the-Loop** 시뮬레이션

문일기*, 이찬규*, 이경수**, 권영도***

Hardware-in-the-Loop Simulation of a Vehicle-to-Vehicle Distance Control System

Ilki Moon, Chankyu Lee, Kyongsu Yi and YoungDo Kwon

Key Words : Stop and Go Cruise Control(정지/서행 순항 제어), Optimal Design(최적설계), Driver Assistance System(운전자 보조 시스템), Intelligent Cruise Control(지능형 순항 제어), Duty Ratio(듀티율), Electronic Vacuum Booster(전자제어 부스터)

Abstract

This paper presents an investigation of a vehicle-to-vehicle distance control using a Hardware-in-the-Loop Simulation(HiLS) system. Since vehicle tests are costly and time consuming, how to establish a efficient and low cost development tool is an important issue. The HiLS system consists of a stepper motor, an electronic vacuum booster, a controller unit and two computers which are used to form real time simulation and to save vehicle parameters and signals of actuator through a CAN(Controller Area Network). Adoption of a CAN for communication is a trend in the automotive industry. Since this environment is the same as that of a real vehicle, a distance control logic verified in laboratory can be easily transferred to a test vehicle.

1. 서론

차간거리제어 시스템의 개발과정에는 실차 실험이 꼭 필요하지만 운전자에게 위험하거나 실제로 구현하기 위하여 많은 시간과 연구비를 필요로 하는 경우가 많이 존재한다. 이와 같은 상황에서 대부분의 연구는 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 진행되고 있으며 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션의 단점을 보완할 수 있는 HiLS(Hardware In the Loop Simulation)시스템이 각광을 받고 있다. 일반적으로 HiLS 시스템은 시뮬레이션 수행시 시스템의 성능을 좌우하는 가장 중요한 부품이나 수식화하기 복잡한 하드웨어를 시뮬레이션 루프 안에 포함시킴으로써 시뮬레이션의 신뢰성을 높일 수 있고, 실시간으로 시뮬레이션이 수행되기 때문에 실차에 바로 적용할 수 있는 단계까지 제어시스템을 개발할 수 있어 개발기간을 단축할 수 있는 장점

이 있다. Deborah⁽¹⁾는 DEC VAX Station II를 이용한 실시간 시뮬레이터를 개발하였고, Jun Cheng⁽²⁾은 80C196과 PC를 이용한 차량제어개발시스템을 구축하였고, 국내에서는 이한주⁽³⁾ 등이 PC 기반의 ABS/TCS HiL 시뮬레이터를 개발하였다.

차간거리제어의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 브레이크는 비선형적인 동특성을 가지고 있어 정확한 모델링이 어렵기 때문에 시뮬레이션의 모델과 실제 시스템은 항상 오차를 가지고 있다. 실제의 브레이크 응답을 가지고 차량의 거동을 예측할 수 있기 때문에 HiLS의 구축은 의의가 있다. 본 연구에서는 최근 자동차 회사들이 도입하고 있는 CAN을 이용하여 실험용 차량과 동일한 네트워크를 사용함으로써 실제 차량실험과 동일한 코드를 사용할 수 있어 효율적인 제어시스템 개발이 가능하다.

차간거리제어는 정지상태를 포함하는 근거리 지능형 순항제어(Intelligent Cruise Control, ICC)의 개념으로써 고속도로에서의 차량 정체 시, 그리고 도시주행 시 정지/서행의 반복적인 동작을 자동으로 제어해주는 기능과 함께 선행차량과의 안전거리를

* 한양대학교 기계공학부 대학원

** 한양대학교 기계공학부

*** 현대자동차

유지하면서 자동 주행하는 기능으로 이루어지는 시스템이다. 아직까지는 상용화된 사례는 없으나 PATH(The Partners for Advanced Transit and Highways), VERTIS(The Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society) 같은 ITS(Intelligent Transport Systems) 선행 연구단체와 유럽과 미국, 일본의 메이저급 자동차 회사에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 BMW 에서는 정지/서행 순항 제어 시스템을 위한 센서 특성이나 기본적인 제어기를 소개하는 단계 까지 연구가 진행되었다.^{(4),(6)}

본 연구에 적용된 차간거리제어 시스템은 선행 차량의 속도 및 차간거리 정보로부터 적절한 안전 거리를 유지하도록 내차의 쓰로를 또는 브레이크를 제어하게 된다. 거리제어는 속도 제어와 거리 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 차량 속도와 거리 제어 알고리즘의 개발을 위해 LQ(Linear Quadratic) 최적 제어 이론이 이용되었다.

2. 차량 모델

Fig.1 은 시뮬레이션에 사용된 비선형 차량 모델을 나타내고 있다.

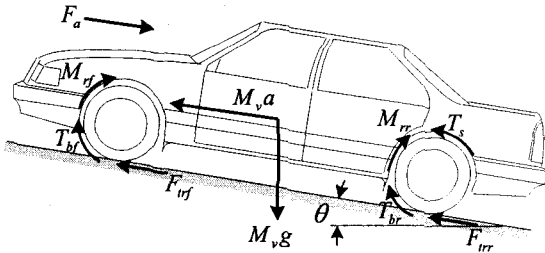


Fig. 1 Vehicle model

차속의 상태 방정식은 다음과 같고, F_{rr} 와 F_{tr} 는 구동륜과 피동륜의 구동력이고 F_a 는 공기저항력, θ 는 도로 경사각도, M_v 는 차량의 총무게, M_r 은 구름저항이다.

$$M_v \dot{v} = F_{tr} + F_{rr} - F_L \quad (1)$$

여기서 F_L 은 주행부하로써 경사부하, 공기부하, 그리고 구름저항에 대한 부하를 모두 포함하는 값이다.

구동륜과 피동륜 휠의 각속도 상태 방정식은 식 (2)와 같고,

$$\begin{aligned} J_{wr} \dot{\omega}_{wr} &= T_s - r_r F_{tr} - T_{br} \\ J_{wf} \dot{\omega}_{wf} &= -r_f F_{trf} - T_{bf} \end{aligned} \quad (2)$$

r_f, r_r 는 전륜/후륜의 반지름, J_{wr} 와 J_{wf} 는 각각의 휠의 관성, T_{br}, T_{bf} 는 각각 바퀴의 제동력을 나타낸다.

3. 차간거리 제어 알고리즘

이전의 대부분의 차량 추종에 관한 연구는 변속기(transmission)의 토크 컨버터(torque converter)가 잠겨있거나(lock) 혹은 토크 컨버터의 속도비가 무시할 수 있는 것으로 가정되었고 그 결과 토크 컨버터의 특성은 제어 문제의 관점에서 고려되지 않았다. 차량이 큰 속도에서 주행하는 지능형 순항 제어의 경우 그 가정이 유효할 지라도 저속의 차간거리 제어의 경우에는 적용되지 않는다. 토크 컨버터가 정지/서행 주행 상황에서 중요한 역할을 하므로 쓰로를/브레이크 제어기법의 개발에 있어서 고려되어야만 한다. Fig.2 은 차간거리 제어 알고리즘을 보여준다.

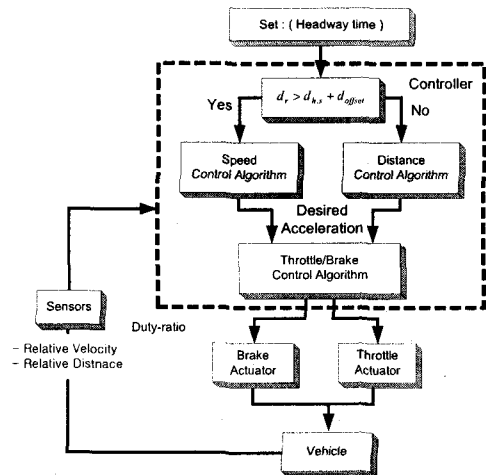


Fig. 2 Schematic of Stop and Go system

제어 알고리즘은 속도와 거리 제어 알고리즘과 결합된 쓰로를/브레이크 제어 기법으로 이루어져 있다. 선행 차량과의 상대거리와 상대속도, 그리고 사전에 선택된 속도가 제어기에 입력된다. 헤드웨이 거리와 선행차량과의 거리의 비교는 다음과 같이 속도 제어와 거리 제어 사이에서 제어 형태를 결정하는데 이용된다.

If $d_r > d_h + d_{offset}$, then "speed control"

Else, then "distance control"

여기서 d_r 은 차량간 상대거리, d_h 는 헤드웨이 거리, d_{offset} 은 오프셋 거리이다.

$$d_h = v_p t_h + d_0 \quad (3)$$

여기서 v_p 는 선행차량의 속도, t_h 는 헤드웨이 시간, 그리고 d_0 는 헤드웨이 오프셋이다.

3.1 속도 제어(Speed Control)

앞차와의 상대거리를 헤드웨이거리에 거리 offset 을 더한 안전거리와 비교하여, 큰 경우는 거리제어를 작은 경우는 속도를 추종할 수 있는 속도제어를 택한다. 일반적으로 주행상황에서 빈번히 일어나는 차선변경의 경우나 거리제어장치를 최초로 작동시킬시 앞차와의 상대거리가 안전거리보다 큰 경우 이를 줄이기 위하여 급격한 가속이 일어나게 된다. 이 같은 상황은 운전자의 운행 패턴과는 차이가 있고 승차감을 해칠 수 있으며 앞차의 가감속 정도에 따라서 위험한 상황에 처할 수도 있는 불안정한 제어이며, 이 같은 현상을 막기 위해 속도제어를 제안하였다. 이 때 추종하도록 제어되는 설정속도는 선행차량의 속도보다 속도 offset 만큼 큰 값으로 결정한다.

$$a_{des} = K(v_{set} - v_{controlled}) \quad (4)$$

$$v_{set} = v_p + v_{offset} \quad (5)$$

여기서 K 는 비례 게인(Proportional gain)이고 v_{offset} 은 $5km/h$ 로 설정한다.

3.2 거리 제어(Distance Control)

상태변수를 식(8)과 같이 결정하고 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x_1 = d_h - d_r, \quad x_2 = v_r \quad (6)$$

$$u = a_{cc}, \quad w = a_p \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} t_h \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (8)$$

여기서 d_h 는 조정된 헤드웨이 거리, d_r 은 상대거리, v_r 은 상대속도, v_{cc} 는 제어되는 차량의 속도, a_{cc} 는 제어되는 차량의 감가속도를 나타낸다.

다음과 같은 성능 지수(Performance Index)를 정의할 수 있고,

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (9)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix}, \quad R = [r] \quad (10)$$

여기서 ρ_1, ρ_2, r 은 성능과 승차감사이에서 상호보완적으로 선택된다. 본 논문에서 $\rho_1 = 1, \rho_2 = 4,$ 그리고 $r = 5$ 로 사용되었다.

이 성능지수로부터 속도, 거리오차와 내차의 감가속도를 최소화하도록 최적 게인 k_1, k_2 를 구하고

최적의 감가속도를 결정하게 된다.

$$a_{cc} = -Kx = -k_1(d_h - d_r) - k_2 v_r \quad (11)$$

4. Hardware-in-the Loop System

4.1 HiLS 의 구성

Fig. 3 는 HiLS 의 개략도이다. HiLS 는 한 개의 Siemens C166 컨트롤러로 구성된 컨트롤러 유닛과 브레이크, 스로틀 액츄에이터, 실시간으로 차량모델을 계산하기 위한 컴퓨터와 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. Fig. 3 에서와 같이 컴퓨터와 컨트롤 유닛 사이의 통신과 스로틀 액츄에이터의 목표각 신호를 액츄에이터에 전달하기 위해 CAN 을 이용한다. 실제 실험용 차량에서는 컨트롤러 유닛의 제어로직은 50 msec 의 주기로 작동하고, 센서로부터 10 msec 간격으로 신호를 받아들인다. 데이터를 저장하는 컴퓨터는 50 msec 의 주기로 차량의 상태정보와 컨트롤 유닛의 제어로직과 관련된 정보들을 저장한다. 각각의 액츄에이터에 부착된 센서를 통하여 측정된 차압과 스로틀각 정보가 10 msec 의 주기로 컴퓨터로 전달되면 수학적 차량모델을 이용한 수치적 적분을 통해 상대속도, 상대거리와 차량속도등 제어로직에 필요한 차량 정보들이 계산되고 같은 주기로 CAN 을 이용하여 컨트롤러 유닛으로 전달된다.

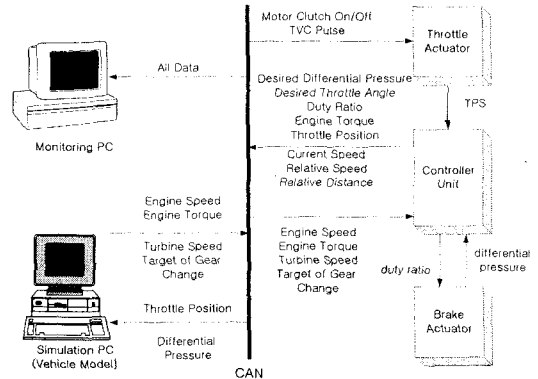


Fig. 3 Schematic of HiLS

이같은 정보를 컨트롤러 유닛에 탑재되어 있는 차간거리제어 알고리즘에 적용하여 목표 감가속도를 계산하고 컨트롤러를 통하여 목표 차압과 목표 스로틀각을 각각의 액츄에이터로 전달한다. 본 연구에서는 차량 감속 제어를 위하여 전자 제어 부스터(Electronic Vacuum Booster, EVB)를 이용하였다.(5),(7)

4.2 브레이크 액츄에이터(Brake actuator)

컨트롤러 유닛에서 제어로직에서 계산된 감가속

도에 따라 PWM 신호를 보내고 이 신호의 듀티율에 따라 EVB 에 차압이 형성된다. 이 차압은 브레이크의 마스터 실린더에 힘을 가하여 제동력을 발생시킨다. 실제의 차량에서는 EVB 에 차압을 발생시키기 위해서 흡기 매니폴드(Intake Manifold)의 진공을 이용하지만, HiLS 에서는 진공펌프를 사용하여 압력을 생성한다. 유압센서를 마스터 실린더 바로 밑에 장착하여 브레이크 라인의 압력을 측정할 수 있도록 하였고 브레이크 라인의 길이는 실제 차량과 동일하도록 제작하였다. Fig. 4 는 HiLS 에 장착된 EVB 사진이다.

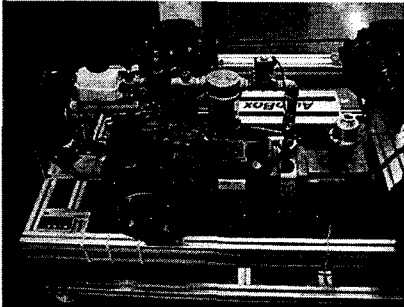


Fig. 4 Electronic vacuum booster

Fig. 5 는 25000 Pa 의 목표차압을 가했을 때 HiLS 에서 생성되는 차압이다. 초기 딜레이가 있지만 생성되는 차압의 레벨은 목표차압을 추종하는 것을 볼 수 있다.

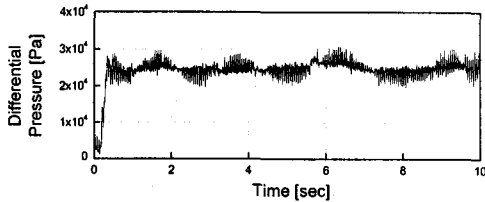


Fig. 5 Response of brake actuator

4.3 쓰로틀 액추에이터(Throttle actuator)

컨트롤러 유닛에서 제어로직에 의해 결정되는 가속도를 추종하기 위하여 원하는 쓰로틀 각을 운전자의 조작없이 시스템에 적용하기 위해서는 쓰로틀 밸브를 제어할 수 있는 장치가 필요하고 본 연구에서는 스텝핑 모터를 이용하였다. Fig. 6 은 HiLS 에 사용된 쓰로틀 액추에이터의 사진이다. 일반적으로 스텝핑 모터는 개루프 제어가 가능하여 피드백이 필요하지 않지만, 쓰로틀 각정보(TPS)가 차량 모델의 시뮬레이션에 필요한 변수이므로 피드백 받아 사용한다.

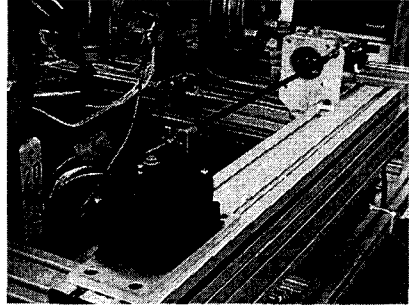


Fig. 6 Throttle actuator

Fig. 7 는 쓰로틀 액추에이터의 반응이다. 쓰로틀 액추에이터의 반응을 살펴보면 스텝핑 모터의 최대속도인 $0.075^\circ/4msec$ 의 기울기를 가지고 목표각을 추종하는 것을 볼 수 있다.

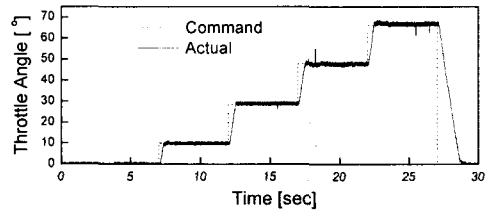


Fig. 7 Response of throttle actuator

5. 실험 결과

앞에서 제안한 제어로직의 성능을 검증하고 구축한 HiLS 의 성능을 확인하기 위하여 실험과 HiLS 시뮬레이션을 수행하였다. 실제차량과 HiLS 의 유사성을 검증하기 위하여 최적제어 개인 값등의 조건들을 모두 동일하게 하였다. 초기조건으로 앞차는 10 m 정도의 상대거리로 15 km/h 의 속도를 유지하고 제어 차량은 앞차와 비슷한 초기속도를 설정한다. 앞차는 초기 속도를 유지하다가 15 sec 후에 사라지고 25 km/h 의 차량이 현재의 상대거리보다 10 m 먼곳에서 나타나는 cut-out 상황으로 설정하였다. 헤드웨이 시간(headway time), t_h 는 1.2 sec 로 설정되었고, 헤드웨이 오프셋 거리(headway offset distance), d_0 는 2m로 설정하였다.

5.1 실차 실험 결과

Fig. 8 은 실제 차량에 차간거리제어 알고리즘을 적용한 결과이다. 초기에 앞차와의 상대거리가 일정범위 내에 있으므로, 거리제어를 통하여 속도, 거리 오차를 줄이고 갑자기 나타나는 차량에 대해

속도제어로 전환하여 거리오차를 줄인 후 다시 거리제어로 전환하여 속도, 거리오차를 동시에 줄여 가는 결과를 보인다.

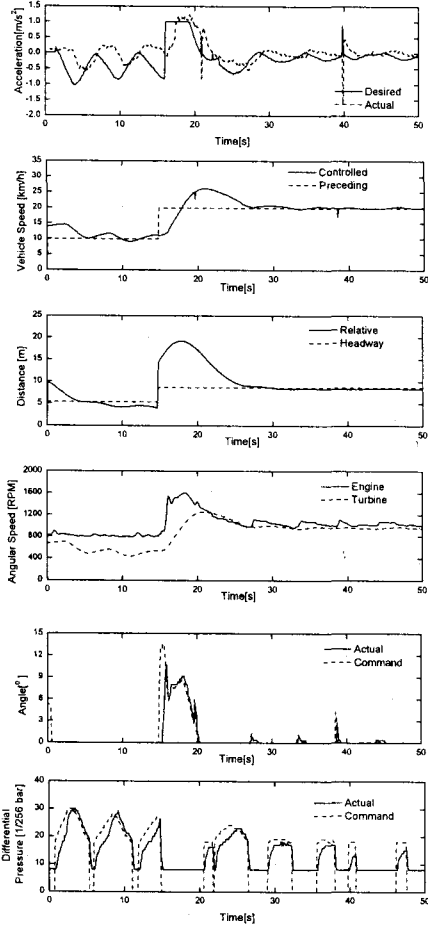


Fig. 8 Experiment results for a low-speed control situation with a cut-out vehicle

5.2 HiLS 를 이용한 저속주행 시뮬레이션

Fig. 9 은 HiLS 시뮬레이션 결과이다. 실제 차량의 실험 결과와 비교하면 감속시 브레이크가 고르게 들어가고 시뮬레이션 후반부의 정속 주행 구간에서 스로틀의 개폐가 잦은 현상을 보인다.

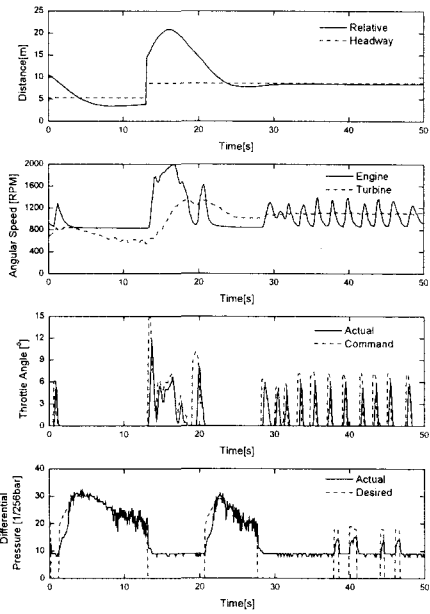
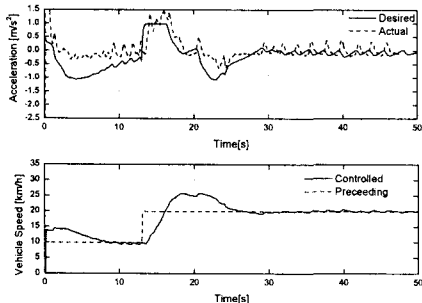
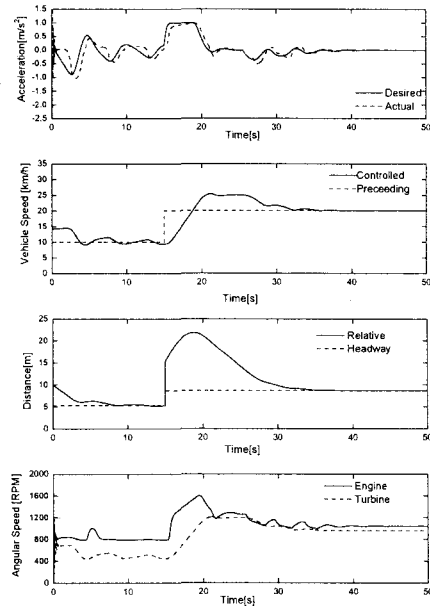


Fig. 9 HiLS results for a low-speed control situation with a cut-out vehicle

5.3 저속주행 시뮬레이션

Fig. 10 은 Simulink 로 구성된 차량모델과 컨트롤러를 이용하여 순수한 시뮬레이션 결과이다. 실제 차량의 실험과 유사한 결과를 보이고 있다.



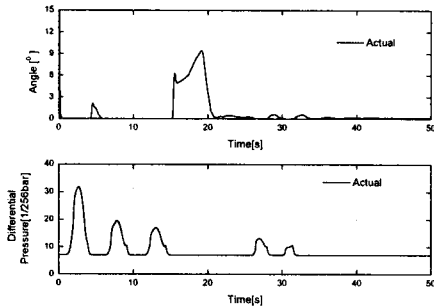


Fig. 10 Simulation results for a low-speed control situation with cut-out vehicle

6. 결론

본 연구에서는 차간거리제어 시스템의 개발을 위하여 실제 실험 차량에 장착된 것과 동일한 브레이크와 스톱틀 액추에이터를 가진 HiLS 를 제작하였다. 또한 실제 차량에서 사용중인 CAN 을 기반으로 네트워크를 구성하였기 때문에 연구실내에서 개발한 제어 로직을 실시간으로 테스트하여 성능을 미리 검증하고, 개발된 제어 로직을 실제 차량에 바로 이식할 수 있는 효율적인 개발환경을 구축할 수 있다. 프로파일로 입력하는 선행차량의 속도로부터 자차와의 상대속도, 상대거리 그리고 자차의 속도를 차량 모델로부터 계산하여 실시간으로 피드백하고, 최적의 감/가속도를 설정하는 알고리즘과 스톱틀/브레이크 제어를 판단하는 전환 알고리즘, 스톱틀과 브레이크의 차량 동역학에 기초한 제어 알고리즘을 사용하여 실제차량과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 통상산업부와 과학기술처에서 시행한 G7 차세대자동차 기술개발사업의 지원으로 이루어진 것으로써 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Deborah Kempf, Loren Bonderson, Leren Slafer, "Real Time Simulation for Application to ABS Development.", SAE paper 870336
- (2) Jun Cheng, Ji-Bo Cui, Guang-Hui Xu "The Integrated Development System for an Electronic Control System", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, June 12-15, 2000, Seoul, Korea, paper no. F2000A088

- (3) 이한주, 박윤기, 서명원, 석창성, 이선일, "ABS/TCS HiL 시뮬레이터 개발", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 제 2 호, pp.858~863
- (4) Dr. Paul Venhovens, Dr. Karl Naab, Bartono Adiprasito. "Stop and Go Cruise Control", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, June 12-15, 2000, Seoul, Korea, paper no. F20001396
- (5) Yi, K., Lee, S., "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
- (6) Prestl, W., "The BMW Active Cruise Control ACC", SAE paper no. 20000344
- (7) Maciuga, D.B. "Nonlinear Robust Control with Application to Brake Control for Automated Highway Systems", Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1997.
- (8) 이동현, 장광수, "슬라이딩 모드를 이용한 차량 간격 자동 제어 알고리즘에 관한 연구". 한국자동차공학회 논문집 8 권 2 호, pp92-101, 2000
- (9) Yi, K., Woo, M., Kim, S., and Lee, S-C., "A Study on a Road-Adaptive CW/CA Algorithm for Automobiles Using HiL Simulations", JSME International Journal, Series C, Vol.42, No.1, 1999, pp.163-170.
- (10) 송재복, "엔진맵에 기초한 엔진제어 TCS 슬립 제어 알고리즘의 개발" 대한기계학회논문집, 22 권, 2 호, pp.428-436, 1998.2.