

# 지능형 순항 제어 시스템 모델링 및 제어

이세진\* · 홍진호\* · 이경수\*\*

(2000년 7월 10일 접수)

## A Modeling and Control of Intelligent Cruise Control Systems

Sejin Lee, Jinho Hong and Kyongsu Yi

**Key Words :** Intelligent Cruise Control(지능형 순항 제어), Optimal Design(최적설계), Electronic Vacuum Booster(전자 제어 부스터), Duty Ratio(듀티율)

### Abstract

A throttle/brake control law for the intelligent cruise control(ICC) systems has been proposed in this paper. The ICC system consists of a vehicle detection sensor, the control algorithm and a throttle/brake actuators. For the control of a throttle/brake system, we introduced a solenoid-valve-controlled electronic vacuum booster and a step-motor controlled throttle actuator. Nonlinear computer model for the electronic vacuum booster has been developed and the simulations were per formed using a complete nonlinear vehicle model. The results indicate the proposed throttle/brake control law can provide the ICC system with an optimized performance.

### 1. 서 론

지능형 순항 제어(ICC) 시스템은 운전자의 조작 없이 차량을 일정한 속도로 유지하거나 차량의 주행 방향에 있는 장애물이나 차량을 감지하여 일정한 거리를 유지하도록 스로틀이나 브레이크를 제어하는 시스템이다. BMW, BENZ에서는 이미 지능형 순항 제어 시스템 개발을 완료하고 운전자의 사용 의견을 분석하고<sup>(1,2)</sup> 있으며 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>(3,6)</sup> 현재 양산된 지능형 순항제어 시스템은 능동안전의 개념보다는 운전자 편의장치의 개념을 담고 있다.<sup>(1)</sup> 지능형 순항 제어 시스템은 점차 지능형 차량의 한 부분인 횡방향 제어 시스템이나 군집주행(Vehicle Platooning) 시스템등과 통합되도록 연구가 진행되고 있으며 그에 따라 그 역할의 중요성이 높아지고 있다.<sup>(4)</sup> 이미 세계적으로 소수의 최상급 차량에 지능형 순항제어 시스템이 탑재되어 있으나 대부분 제어영역이 좁고 헤드웨이 거리(Headway Distance) 또한 매우

길게 설정되어 있다. 유용하고 신뢰성 있는 시스템을 구축하기 위해서는 더욱 정밀한 제어능력이 요구된다. 본 연구에서는 보다 정밀한 제어능력을 제공할 수 있도록 스로틀과 브레이크 제어 알고리즘과 이를 상황에 따라 변화시키는 전환 논리(Switching logic)를 설계하였고, 시뮬레이션과 실차 실험을 통해 여러 ICC 상황에서의 제어성능을 확인하였다.

### 2. ICC 시스템 구성

지능형 순항 제어 시스템은 운전자가 목표속도와 차간거리를 설정하는 운전자 인터페이스 부분과 앞차와의 상대거리 및 상대속도를 추정하는 레이다 센서, 현재의 상황에서 감/가속을 결정하고 각 스로틀/브레이크 액추에이터를 제어하는 컨트롤 유닛, 그리고 각 액추에이터로 구성되어 있으며 이의 구성을 Fig. 1에 나타내었다.

#### 2.1 제어 유닛 (Control Unit)

본 연구에서는 지능형 순항제어를 위하여 3개의 제어 유닛을 사용하였고 이 제어기 사이의 데이터 전달은 CAN 통신으로 이루어진다. 제어유닛은 인텔 80C196 의 16bit 마이크로 프로세서를 사

\* 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과  
E-mail : ruined@hitel.net  
TEL : (02)2281-7194 FAX : (02)2296-0561

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

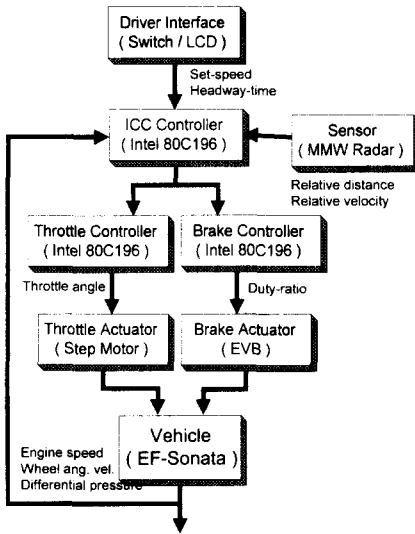


Fig. 1 Configuration of ICC system

용하였고 A/D 컨버터와 직렬통신 포트, PWM 출력과 디지털 입출력선 등을 가지고 있다.

ICC 제어유닛은 현재의 상황에서 차량의 가/감속을 결정하여 스로틀/브레이크를 판단하고 각 스로틀/브레이크 제어유닛으로 목표 스로틀 각과 목표 차압을 전달하게 되고, 각 스로틀/브레이크 제어 유닛은 현재의 스로틀 각과 차압이 목표값을 추종하도록 제어하게 된다.

2.2 센서

제어 차량의 주행방향에 있는 장애물이나 차량을 감지하여 상대거리 및 상대속도를 얻기 위하여 본 연구에서는 밀리미터파 레이더(MMW Radar) 센서를 이용하였다. 이는 1 개의 송신 안테나와 3 개의 수신 안테나로 이루어진 센서 전단부와 신호처리를 위한 디지털 신호 처리부로 구성되며, 안테나는 혼형으로 송신은 9°, 수신은 각 3.5°의 빔폭을 가진다. 구동방식은 삼각파형으로 주파수 변조된 연속파를 이용하여 표적의 거리와 속도를 검출하고, 거리 측정은 3~150m 사이에서 1m의 분해능을 가지며 속도는 3.6km/h~250km/h 사이에서 3.6km/h의 분해능을 가진다. Fig. 2는 실제 센서가 장착된 ICC 차량을 나타내었다.

2.3 스로틀 액추에이터 (Throttle actuator)

본 시스템에서는 운전자의 조작없이 스로틀 밸브를 제어할 수 있는 장치로써 스텝 모터를 사용하였고 스로틀 밸브에 또 하나의 풀리(Pulley)를 두고 케이블로 연결하여 스로틀 밸브를 제어하게 된다.

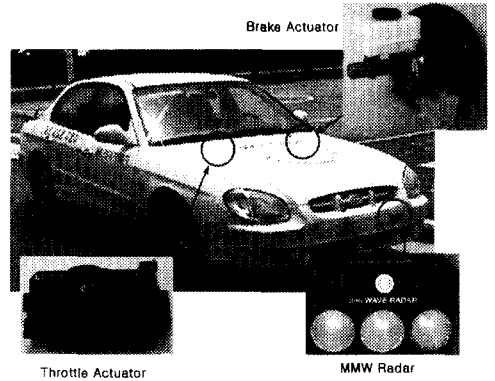


Fig. 2 ICC Test Vehicle

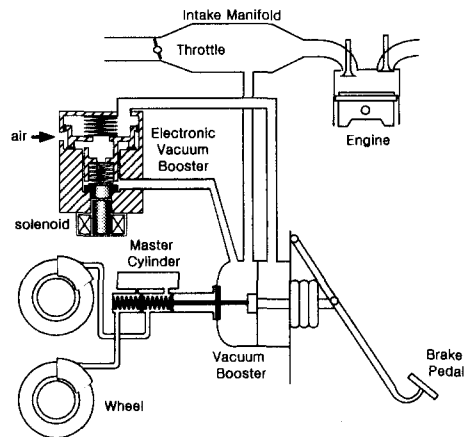


Fig. 3 Schematic of electronic vacuum booster system

시스템이 동작중이 아닐 때는 운전자가 밟은 만큼 스로틀 밸브가 열리며 시스템이 동작중일 때에는 스텝 모터에 의해 스로틀 밸브가 제어된다. 본 스텝모터는 250pps(pulse/sec)의 펄스속도(Pulse rate)를 가지며 1 pulse에 stroke는 0.04mm이며 스로틀 개도는 0.075° 회전한다.

2.4 브레이크 액추에이터 (Brake actuator)

본 연구에서는 차량 감속 제어를 위하여 전자 제어 부스터(Electronic vacuum booster)를 이용하였고 PWM 신호의 듀티율(Duty-ratio)에 따라 설치된 솔레노이드 밸브에서 전기적인 힘이 발생하고 진공 부스터(Vacuum booster)에 차압이 형성된다. 형성된 차압은 브레이크의 마스터 실린더(Master cylinder)에 힘을 가하여 제동력을 발생시킨다.

차량에서는 진공 부스터에 차압을 발생시키기 위해 흡기 매니폴드(Intake manifold)의 진공을 사용하며 Fig. 3은 이에 대한 그림을 보여준다.

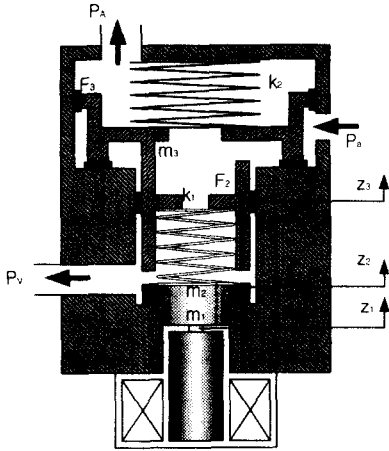


Fig. 4 Brake actuator model

### 3. 전자 제어 부스터 모델링 및 해석

본 연구에서는 진공 부스터에 별도의 제어 밸브를 추가하여 필요시에 대기압을 부스터로 유입시켜 제동력을 조절/발생시키는 전자제어 부스터를 이용하였다. 이의 제어 알고리즘 개발을 위해 전자 제어 부스터 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통해 검증하였으며 실험 결과와 비교하였다. 브레이크 액추에이터 모델은 Fig. 4에 나타내었고 그 운동방정식은 식 (1)-(5)와 같다. Fig. 5는 이를 모델링하여 정지 상태에서 듀티율이 60%일 때의 시뮬레이션 결과로써 솔레노이드 밸브에서 전기적 힘이 발생하고 이 힘에 의해서 Fig. 5와 같이 각각의 질량들이 움직이게 되어 외부 공기가 진공부스터에 작용하여 제동력을 발생시키게 된다. Fig. 5에서 대기흡입 밸브가 열렸다가 평행 상태로 되면서 닫히는 것을 볼 수 있고, 그 사이에 압력 형성이 이루어지게 된다.

$$z_{g1} = z_{g1o} - (z_1 - z_2) \quad (1)$$

$$z_{g2} = z_{g2o} - (z_2 - z_3) \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = F_{pwm} - k_{g1}(z_1 - z_2) - m_1 g - b_1 \dot{z}_1 - b_{g1}(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = -k_{g1}(z_2 - z_1) - k_{g2}(z_2 - z_3) - k_1(z_2 - z_3) - \text{sign}(\dot{z}_2)F_1 - F_{spring1} - F_{press} - m_2 g - b_2 \dot{z}_2 - b_{g1}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - b_{g2}(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) \quad (4)$$

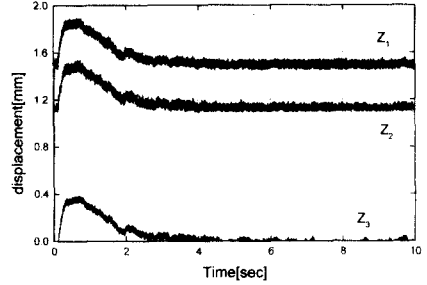


Fig. 5 Mass displacements of EVB

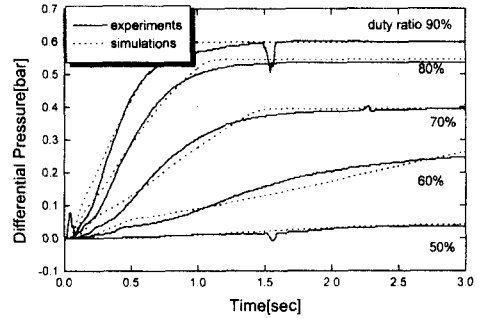


Fig. 6 Comparison of experiment and simulation results

$$m_3 \ddot{z}_3 = -k_{g2}(z_3 - z_2) - k_1(z_3 - z_2) - \text{sign}(\dot{z}_2)(F_2 + F_3) - k_2 z_3 - F_{spring1} - F_{spring2} - m_3 g - b_3 \dot{z}_3 - b_{g2}(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) \quad (5)$$

여기서,  $F_{press} = (P_A - P_v) \times \pi \times (d_{down}^2 - d_{up}^2) / 4$  이고,  $F_{spring1}, F_{spring2}$ 는 초기 스프링 장력,  $m$ 은 중량,  $z$ 는 변위,  $k$ 는 스프링 상수,  $b$ 는 댐핑 계수, 아래첨자 1,2,3은 각 중량을 의미한다.

### 4. 제어기법 설계

Fig. 6은 전체적인 ICC 제어 시스템의 제어기 설계에 대해 나타내었다. ICC는 운전자가 설정한 속도를 유지하도록 제어하다가 앞차량이 발견되면 헤드웨이 차간거리를 유지하도록 쓰로틀 또는 브레이크를 제어하게 된다.

#### 4.1 목표 감가속도 설계

거리 제어시에는 현재의 상황에서의 목표 감가속도를 계산하기 위해서 앞 차량과의 상대속도, 상대거리 그리고 내 차 속도를 피드백하여 최적의 감가속도를 설정하였다. 먼저 상태변수를 식 (6)과

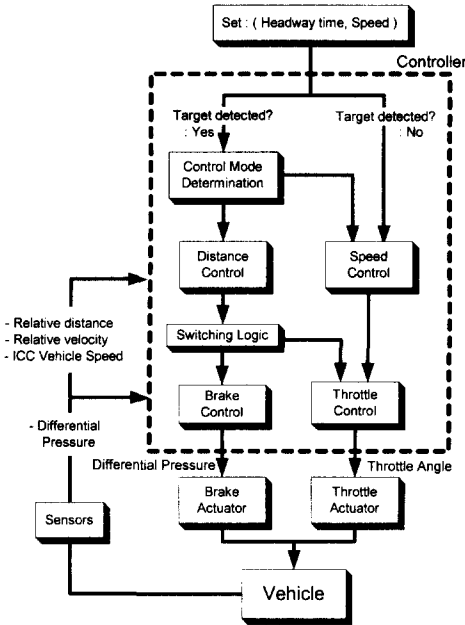


Fig. 7 Schematic of ICC system

같이 정의하고 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x_1 = d_r - t_h v_{cc}, \quad x_2 = v_r \quad (6)$$

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

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

다음과 같은 성능 지수(Performance Index)를 정의하고 속도,거리오차와 내 차의 감/가속도를 최소화하도록 제어입력  $u$ 를 결정하게 된다.

$$J = \int [x_1^2 + \rho_1 x_2^2 + \rho_2 u^2] dt \quad (9)$$

여기서,  $d_r$ 은 상대거리,  $t_h$ 는 헤드웨이 거리,  $v_{cc}$ 는 내 차속,  $v_r$ 은 상대속도,  $a_{cc}$ 는 내차의 감가속도를 나타낸다.

$$u = -Kx = -k_1(d_r - t_h v_{cc}) - k_2 v_r \quad (10)$$

속도제어시에는 아래 식과 같이 설정속도  $v_{set}$  과 내 차속의 차이에 비례이득을 곱하여 감가속도를 계산한다.

$$u = -k \cdot x_1 = -k \cdot (v_{set} - v_{cc}) \quad (11)$$

이로부터 최적 계인을 구하여 감/가속도를 구하고, 최대 감/가속도의 한계를 두고 이를 추종하도록 2 차 필터를 사용하였다. 이와 같은 감/가속도 계산과정을 Fig. 7에 요약하여 나타내었다.

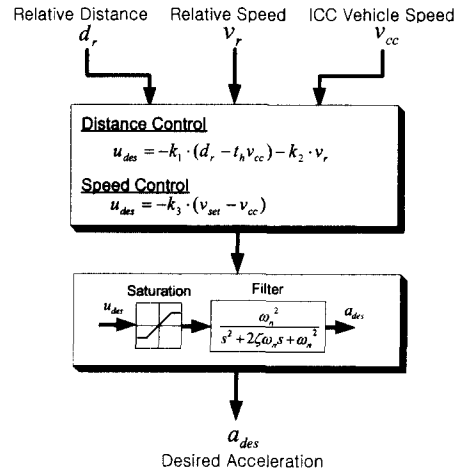


Fig. 8 Calculation of desired acceleration

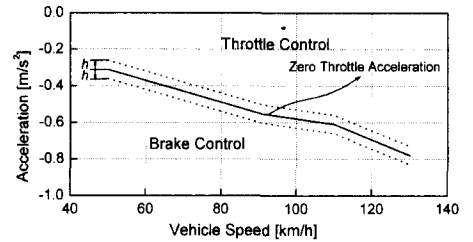


Fig. 9 Switching logic with hysteresis

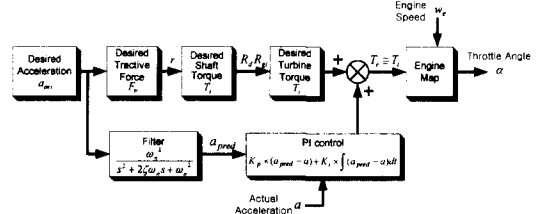


Fig. 10 Throttle control

4.2 드로틀/브레이크 전환논리(switching logic)

목표감가속도가 계산되면 실제 드로틀 제어만으로 가능한 범위를 Fig. 8 과 같이 정의할 수 있다. 0.05 m/sec<sup>2</sup>의 이력현상(Hysteresis) 범위내에서는 제어를 하지않고 그 이상으로 벗어났을 때 드로틀이나 브레이크 제어를 판단하게 된다.

4.3 드로틀 제어(Throttle control)

드로틀 제어는 ICC 시작시, 현재 속도를 유지하다가 운전자가 목표속도를 설정하였을 때 설정속도를 추종하도록 한다. 이를 위해 현재 상황에서의 목표 가속도가 계산되어지고 이를 추종하도록 차량동역학에 기반한 쓰로틀 각 계산과 가속도 오

차에 따른 PI 제어를 하였다. 이에 대한 개략도를 Fig. 9에 나타내었다.

단순화된 차량모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_v a = \frac{1}{r} (T_s - (T_{bf} + T_{br})) - F_L \quad (12)$$

여기서,  $T_s$ 는 구동축 토크,  $T_{bf}$ 과  $T_{br}$ 는 각각 전, 후륜의 브레이크 토크,  $F_L$ 은 주행부하  $M_v$ 는 차량의 총 무게,  $r$ 은 휠반경이다. 위식으로부터 목표 구동축 토크  $T_s$ 는 다음과 같다.

$$(T_s)_{des} = r(M_v a_{des} + F_L) \quad (13)$$

이것으로부터 터빈 토크를 다음과 같이 정의한다. 이때,  $R_g$ 는 기어비,  $R_d$ 는 종감속비이다.

$$(T_t)_{des} = (T_s)_{des} \times (R_g R_d) \quad (14)$$

이때의 터빈 토크를 엔진 토크와 크게 차이가 나지 않는 상황이라 가정하고 현재의 엔진 각속도로부터 엔진맵(Engine map)을 이용하여 목표 스로틀 각(Desired throttle angle)을 정의한다.

$$\alpha_{des} = EM^{-1}(\omega_e, T_{t,des}) \quad (15)$$

#### 4.4 브레이크 제어(Brake Control)

드로틀 제어(Throttle control)만으로 목표 감속도(Desired deceleration)가 추종되지 못한 경우, 브레이크 제어가 필요하게 된다. 먼저, 앞에서 구해진 목표 감속도를 추종하도록 차량과 휠의 동역학으로부터 브레이크 토크를 정의한다.

$$(T_{bf} + T_{br}) = T_s - r(M_v \frac{dv}{dt} + F_L) \quad (16)$$

브레이크 토크와 휠 캘리퍼 압력과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_b = K_b P_w \quad (17)$$

이로부터 다음과 같이 목표 감속도에 따른 목표 휠 압력을 정의할 수 있다.

$$P_{w,des} = \frac{1}{K_b} [-r(M_v a_{des} + F_L) + T_s] \quad (18)$$

식 (18)을 드로틀을 완전히 닫힌 경우의 감속도  $a_0$ 에 관해 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{w,des} = \frac{1}{K_b} [-rM_v (a_{des} - a_0)] \quad (19)$$

위에서 목표 휠 압력이 정의되면, 진공부스터(Vacuum booster)의 목표 차압은 다음과 같이 정의

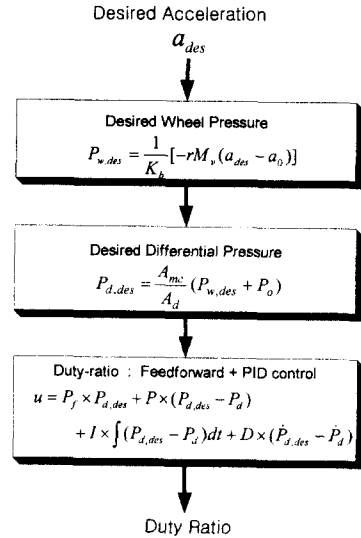


Fig. 11 Brake control

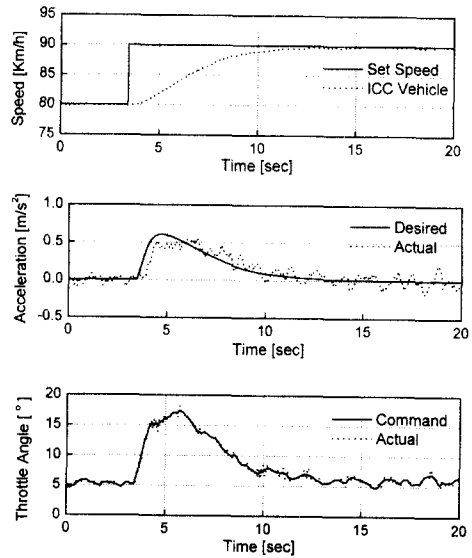


Fig. 12 Set-speed control

할 수 있다.

$$P_{d,des} = \frac{A_{mc}}{A_d} P_{mc,des} \quad (20)$$

이 목표 차압을 추종하도록 Feedforward+PID 제어를 통해 듀티율을 다음과 같이 계산하였다.

$$u = P_f \times P_{d,des} + P \times (P_{d,des} - P_d) + I \times \int (P_{d,des} - P_d) dt + D \times (\dot{P}_{d,des} - \dot{P}_d) \quad (21)$$

위의 브레이크 제어에 관한 전체적인 개략도를 Fig. 10에 나타내었다.

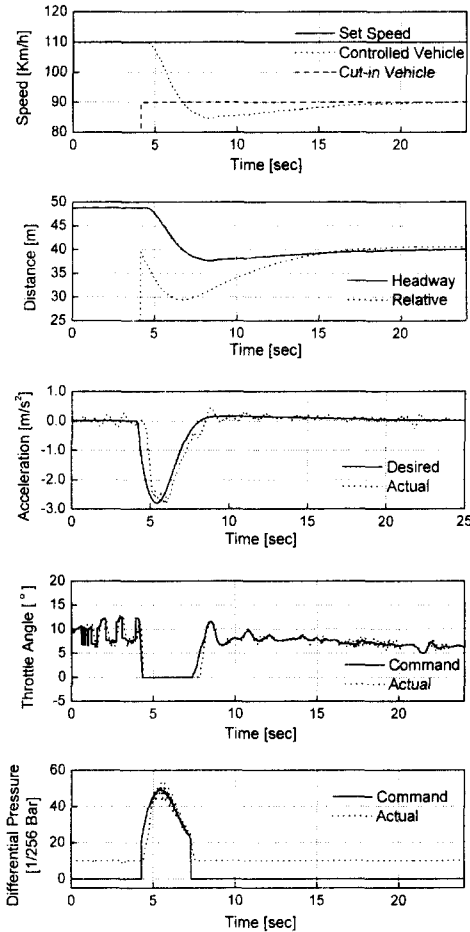


Fig. 13 Vehicle-to-vehicle distance control

### 5. 실험 결과

앞에서 설명한 제어로직을 사용하여 여러 상황에서 실차 실험을 수행하였으며 대표적인 결과를 Fig. 12 와 Fig. 13 에 나타내었다.

Fig. 12 는 설정속도를 80 km/h 로 설정하여 주행하고 있는 중에 설정속도를 90km/h 로 변경한 경우의 실험결과이다. Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 속도나 가속도 모두 목표치를 제대로 추종하고 있다.

Fig. 13 은 설정속도를 110 km/h 로 설정하여 주행하고 있는 중에 90km/h 인 차량이 전방 40m 의 거리에 끼어 든 경우의 실험결과를 나타낸다. 차량이 끼어 들자 바로 감속을 시작하여 Headway time 거리를 잘 유지하도록 브레이크와 스로틀을 잘 제어하고 있음을 볼 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 지능형 순항 제어를 위한 시스템을 설계하였고, 이는 센서, 제어기 그리고 스로틀/브레이크 액추에이터 등으로 구성되어 있다. 브레이크 액추에이터인 전자제어 부스터(EVB)를 해석/모델링하였고, 이 모델을 이용하여 ICC 상황에서의 브레이크 및 스로틀 제어 알고리즘을 설계하였다. 현재 상황에서 앞 차량과의 상대속도, 상대거리, 내차속도를 피드백하여 최적 감가속도를 설정하는 알고리즘과 스로틀/브레이크 제어를 판단하는 스위칭 알고리즘, 각 스로틀과 브레이크의 차량동역학에 기초한 제어알고리즘을 제안하였다. 실차를 이용한 실험을 통해서 제안한 제어 알고리즘을 검증하였고, 향후 제안한 ICC 제어 시스템의 다양한 주행상황에 대하여 제어성능을 확인할 예정이다.

### 후 기

이 연구는 2000 년도 한양대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

### 참고문헌

- (1) Weinberg, M., Winner, H. and Bubb, H. 2000, "Adaptive Cruise Control Long-Term Field Operational Test," *Proceeding of AVEC*, Ann Arbor Michigan.
- (2) Goudy, R. and Andrews, S. 1998, "Brake Control Strategy for Optimized Safety and Comfort," 5th World Congress on ITS, Seoul, Korea.
- (3) Maciucă, 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.
- (4) Winner, H. and Wittie, S. "Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends," SAE 961010.
- (5) Hoess, A., Hosp, W. and Doerfler, R. "Longitudinal Autonomous Vehicle Control Utilizing Access to Electronic Throttle Control, Automatic Transmission and Brakes," SAE 961009.
- (6) 송재복, 변경석, 1997, "시간지연 제어에 기초한 스로틀 액추에이터 시스템의 제어," 대한기계학회논문집 제 21 권, 제 12 호, pp. 2081~2089.
- (7) Seiler, P., Song, B. and Hedrick, J. K. 1998, "Development of a Collision Avoidance System," *SAE Conference*, Detroit, Michigan, pp. 97~103.
- (8) Yi, K., Woo, M., Kim, S. and Lee, S.-C. 1999, "A Study on a Road-Adaptive CW/CA Algorithm for Automobiles Using HiL Simulations," *JSME Journal*, Series C, Vol. 42, No. 1, pp.163~170.