

정지/서행 순항 제어 시스템을 위한 스로틀/브레이크 제어기법

홍진호* · 이경수**

A Throttle/Brake Control Law for Stop and Go Cruise Control System

Jinho Hong and Kyongsu Yi

Key Words : Stop and Go Cruise Control(정지/서행 순항 제어), Optimal Design(최적설계), Switching Logic(전환논리), Driver Assistance System(운전자 보조 시스템), Intelligent Cruise Control(지능형 순항 제어), Duty Ratio(듀티율)

Abstract

This paper addresses a throttle/brake control law for stop and go cruise control systems which make the vehicle remain at a safe distance from a preceding vehicle according to the driver's preference, automatically slow down and come to a full stop behind a preceding vehicle. The uncertainties of vehicle model have been considered in the design of the control law. The effect of throttle/brake control has been investigated via simulations. The simulations were performed using a complete nonlinear vehicle model. The results indicate that the proposed throttle/brake control law can provide the stop and go cruise control system with a good distance tracking performance.

1. 서 론

정지/서행 순항 제어 시스템은 정지를 포함하는 근거리 지능형 순항 제어(Intelligent Cruise Control, ICC)의 확장 개념으로써 고속도로에서의 차량 정체 시, 그리고 도시주행 시 정지/서행의 반복적인 동작을 자동으로 제어해주는 기능과 함께 선행차량과의 안전거리를 유지하면서 자동 주행하는 기능으로 이루어지는 시스템이다. 이러한 기능은 매우 효과적이며 일반적으로 운전자들이 바라는 기능으로 알려져 있다.

이러한 시스템은 지금까지 연구의 초점이 되어 온 차량 종방향 운전자 보조 시스템인 ICC 와 비교하여 교통정체가 심한 실제 도로 주행 양상을 살펴보면 ICC 시스템이 적용될 수 있는 구간보다는 정지/서행 순항 제어 시스템이 적용될 수 있는 구간이 훨씬 많은 것으로 보고되었고 이 때문에

앞으로 정지/서행 순항 제어 시스템에 대한 연구가 ICC 의 연장선상에서 활발히 진행될 것으로 보인다.

현재 정지/서행 순항 제어 시스템을 개발하여 상용화한 사례는 아직 없으나 PATH(The Partners for Advanced Transit and Highways), ERTICO(Organization for Intelligent Transport Systems in Europe) 그리고 VERTIS(The Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society) 같은 ITS(Intelligent Transport Systems) 선행 연구단체에서 주도적으로 연구하고 있다. 또한 BMW 에서는 정지/서행 순항 제어 시스템을 위한 센서 특성이나 기본적인 제어기를 소개하는 단계까지 연구가 진행되었다.^{(1),(3)}

정지/서행 순항 제어 시스템은 선행차량의 속도 및 차간거리 정보로부터 적절한 안전거리(헤드웨이 시간을 기준으로 하는 차간거리와 최소거리)를 유지하도록 내차의 스로틀 또는 브레이크를 제어하게 된다. 본 논문에서는 스로틀과 브레이크를 제어하는 제어 알고리즘과 설계하였고, 엔진과 브레이크의 응답지연과 토크 컨버터 데이터의 에러를 고려한 시뮬레이션을 통해 정지/서행 순항 제

* 한양대학교 자동차공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부

어성능을 확인하였다.

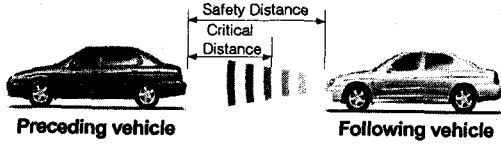


Fig. 1 Stop and Go cruise control system

2. 차량 모델

Fig.2 은 시뮬레이션에 사용된 비선형 차량 모델을 나타내었다.

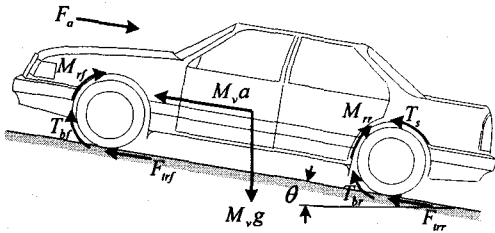


Fig. 2 Vehicle model

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

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

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

구동륜과 피동륜 휠의 각속도 상태 방정식은 식 (2)와 같고,

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

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.

본 연구에서는 차량 감속 제어를 위하여 전자 제어 부스터(Electronic Vacuum Booster, EVB)를 이용하였고, Fig.3 은 개략적인 전자 제어 부스터 시스템을 나타내고 있다.⁽²⁾

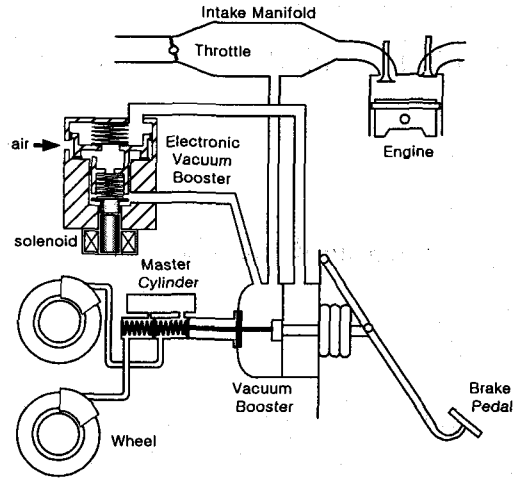


Fig. 3 Schematic of electronic vacuum booster system

3. 제어기법 설계

Fig.4 는 전체적인 정지/서행 순항 제어 시스템의 제어기 설계에 대해 나타내었다. 정지/서행 순항 제어 시스템은 선행차량의 속도 및 차간거리 정보로부터 적절한 안전거리를 유지하도록 자차의 쓰로를 또는 브레이크를 제어하게 된다.

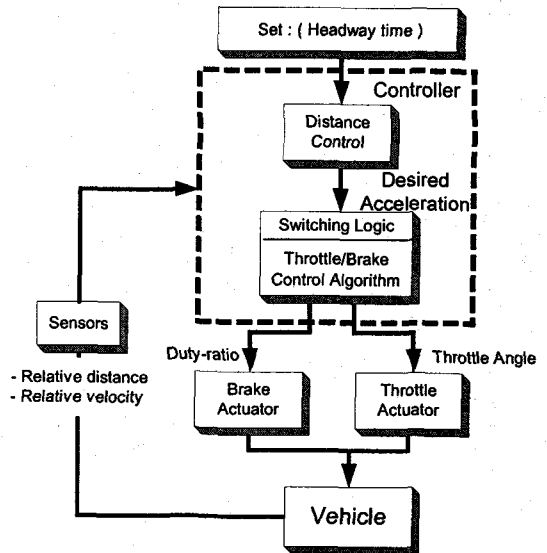


Fig. 4 Schematic of stop and Go system

3.1 목표 감가속도 설계(거리 제어)

우선 안전거리를 정의한다. 앞의 Fig.1 에서 보는 바와 같이 정지/서행 순항 제어의 안전거리는

선행차량의 정지 시 지켜야 하는 최소한의 거리와 헤드웨이 시간(Headway time)에 따른 거리의 합으로 이루어진다.

$$d_s = t_h v_p + d_c \quad (3)$$

여기서 t_h 는 헤드웨이 시간으로 1sec 로 정의하고, v_p 는 선행차량의 속도, d_c 는 선행차량과의 최소거리로써 2m로 정의하였다.

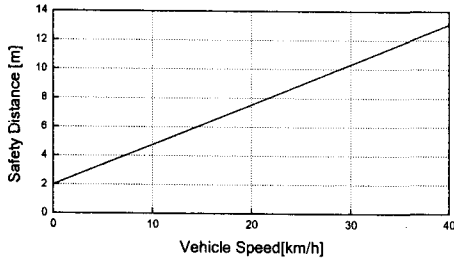


Fig. 5 Safety distance

거리 제어시에는 현재의 상황에서의 목표 감가속도를 계산하기 위해서 앞 차량과의 상대속도, 상대거리 그리고 내 차 속도를 피드백하여 최적의 감가속도를 설정하였다. 먼저 상태변수를 식(4)와 같이 정의하고 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x_1 = d_s - d_r, \quad x_2 = v_r \quad (4)$$

$$u = a_{cc}, \quad w = a_p \quad (5)$$

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

여기서 d_s 는 식(3)에서 정의된 안전거리, d_r 은 상대거리, v_r 은 상대속도, v_{cc} 는 제어되는 차량의 속도, v_r 은 상대속도, a_{cc} 는 내차의 감가속도를 나타낸다.

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

$$J = \int [x_1^2 + \rho_1 x_2^2 + \rho_2 u^2] dt \quad (7)$$

이 성능지수로부터 속도, 거리오차와 내차의 감/가속도를 최소화하도록 다음의 제어입력 u 를 결정하게 된다.

$$u = -\mathbf{K}\mathbf{x} = -k_1(d_s - d_r) - k_2 v_r \quad (8)$$

앞의 최적 제어로부터 계인을 구하여 감/가속도를 정의하고, 과도한 저크를 피하기 위하여 2차 필터를 사용하여 구하여진 감/가속도를 추종한다.

3.2 스로틀/브레이크 전환논리(switching logic)

목표감가속도가 나오면 실제 스로틀 제어만으로 가능한 범위를 Fig.6 과 같이 정의할 수 있다. 0.05 m/sec^2 의 이력현상(Hysteresis) 범위내에서는 제어를 하지않고 그 이상으로 벗어났을 때 스로틀이나 브레이크 제어를 판단하게 된다.

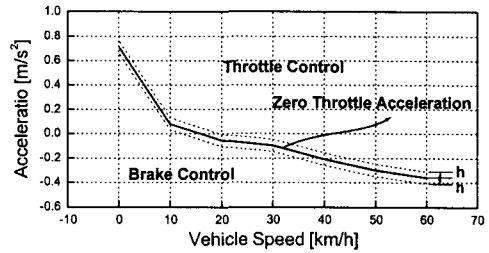


Fig. 6 Switching logic with hysteresis

3.3 스로틀 제어(Throttle control)

스로틀 제어는 선행차량의 지속 주행 시 속도 정보를 이용하여 적절한 안전거리를 유지하도록 자차의 속도를 제어한다. 이를 위해 현재 상황에서의 목표 가속도가 계산되어지고 이를 추종하도록 차량동역학에 기반한 스로틀 각 계산과 가속도 오차에 따른 비례적분 제어를 하였다. 이에 대한 개략도를 Fig.7에 나타내었다.

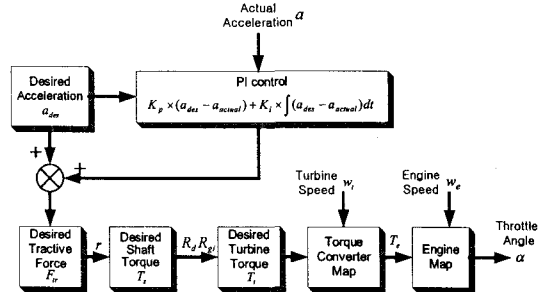


Fig. 7 Throttle control

단순화된 차량모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_v a = \frac{1}{r} (T_s - (T_{bf} + T_{br})) - F_L \quad (9)$$

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 목표가속도가 주어졌을 때, 목표 구동축 토크 $T_{s,des}$ 는 다음과 같다.

$$(T_s)_{des} = r(M_v a_{des} + F_L) \quad (10)$$

이것으로부터 목표 터빈 토크를 다음과 같이 결정된다.

$$(T_t)_{des} = (T_s)_{des} \times (R_g R_d) \quad (11)$$

여기서 R_g 는 기어비, R_d 는 종감속비이다.

현재의 터빈 각속도 ω_t 와 위에서 구하여진 목표 터빈 토크 $\omega_{t,des}$ 로부터 토크 컨버터 맵 (Torque converter map)을 이용하여 목표 엔진 속도, $\omega_{e,des}$ 를 계산할 수 있다.

$$(\omega_e)_{des} = TCM^{-1}(\omega_t, T_{t,des}) \quad (12)$$

여기서 TCM^{-1} 은 역 토크 컨버터 맵(Inverse torque converter map)을 의미한다.

또한 엔진 동역학(Engine dynamics)을 고려해보면, 식(13)으로 표현된다.

$$J_e \frac{d\omega_e}{dt} = T_{net}(\omega_e, \alpha) - T_p(\omega_e, \omega_t) \quad (13)$$

여기서 $T_{net}(\omega_e, \alpha)$ 는 엔진 속도 ω_e 와 쓰로틀 각 α 을 엔진맵(Engine map)에 대입하여 엔진 토크 T_e 를 계산할 수 있는 함수이며, $T_p(\omega_e, \omega_t)$ 는 엔진 속도와 터빈 속도 ω_t 를 토크 컨버터 맵에 대입하여 펌프 토크 T_p 를 계산하는 함수를 의미한다.

원하는 엔진의 거동은 다음과 같이 목표 엔진 속도와 실제 엔진의 속도의 차이에 게인 K_p 를 곱하는 식으로 결정된다.

$$J_e \frac{d\omega_e}{dt} = K_p(\omega_{e,des} - \omega_e) \quad (14)$$

식(13)과 식(14)로부터 다음의 목표 엔진 토크 $T_{e,des}$ 를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} (T_e)_{des} &= T_{net}(\omega_e, \alpha) \\ &= T_p(\omega_e, \omega_t) + K_p(\omega_{e,des} - \omega_e) \end{aligned} \quad (15)$$

현재의 엔진 각속도로부터 엔진맵을 이용하여 위의 목표 엔진 토크를 발생시킬 수 있도록 목표 쓰로틀 각(Desired throttle angle)을 결정한다.

$$\alpha_{des} = EM^{-1}(\omega_e, T_{e,des}) \quad (16)$$

여기서 EM^{-1} 은 역 엔진맵(Inverse engine map)을 나타낸다.

위의 목표 터빈 토크로부터 쓰로틀 각을 구하는 단계까지를 Fig.8 에서 보여주고 있다.

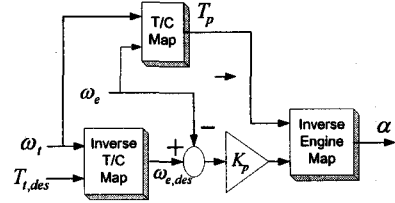


Fig. 8 Calculation Procedure of throttle angle

3.4 브레이크 제어(Brake Control)

정지/서행 순항 제어 시스템에서 브레이크 제어는 선행차량과의 거리가 크지 않은 상황에서 선행 차량의 정지나 서행에 민감하게 반응해야 하므로 기존의 ICC 에서의 그것보다는 더 중요하며 앞에서 구해진 목표 감속도를 정밀하게 추종하는 것이 필요하다. 또한 브레이크 응답지연과 EVB 모델 응답지연을 보상하기 위해 감속도 추종에 다음과 같은 피드포워드와 비례적분(PID+Feedforward) 제어를 채택하였다.

$$\begin{aligned} a_{des_FP} &= a_{des} + P \times (a_{des} - a_{actual}) \\ &+ I \times \int (a_{des} - a_{actual}) dt + D \times (a_{des} - a_{actual}) \end{aligned} \quad (17)$$

앞에서 구해진 목표 감속도를 추종하도록 차량과 휠의 동역학으로부터 브레이크 토크 T_b 를 결정한다.

$$(T_{bf} + T_{br}) = T_s - r(M_v \frac{dv}{dt} + F_L) \quad (18)$$

여기서 T_{br}/T_{bf} 는 전/후륜의 브레이크 토크를 나타낸다.

브레이크 토크와 휠 캘리퍼 압력 P_w 과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_b = K_b P_w \quad (19)$$

여기서 K_b 는 브레이크 토크 게인(Brake torque gain)이다.

이로부터 다음과 같이 목표 감속도에 따른 목

표 휠 압력 $P_{w,des}$ 을 계산할 수 있다.

$$P_{w,des} = \frac{1}{K_b} [-r(M_v a_{des_FP} + F_L) + T_s] \quad (20)$$

식(20)을 스로틀이 완전히 닫힌 경우의 감속도 a_0 에 관해 나타내면 식(21)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{d,des} = \frac{1}{K_b} [-rM_v(a_{des_FP} - a_0)] \quad (21)$$

위에서 목표 휠 압력이 계산되면, 진공부스터 (Vacuum booster)의 목표 차압은 다음과 같이 표현 된다.

$$P_{d,des} = \frac{A_{mc}}{A_d} P_{mc,des} \quad (22)$$

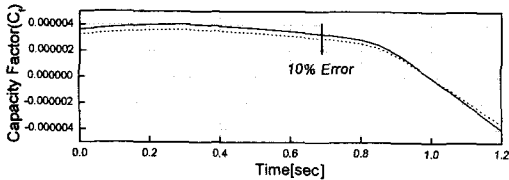
이 목표 차압을 추종하도록 피드포워드와 비례적분 제어를 통해 듀티율을 다음과 같이 계산하였다.

$$u = P_f \times P_{d,des} + P \times (P_{d,des} - P_d) + I \times \int (P_{d,des} - P_d) dt + D \times (\dot{P}_{d,des} - \dot{P}_d) \quad (23)$$

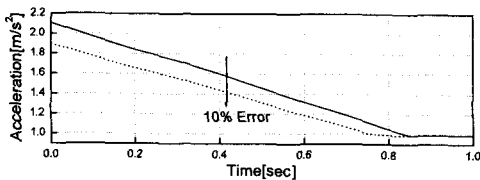
4. 시뮬레이션 결과

앞에서 설명한 제어 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 실차 실험에서 나타나는 엔진 응답 지연과 브레이크 응답 지연, 그리고 실제 차량의 토크 컨버터와 튜닝된 데이터와의 오차를 고려하였다.

고려된 실제 차량의 토크 컨버터와 튜닝된 토크 컨버터 데이터와의 오차는 10%이며 Fig.9 와 같다.



(a) Capacity Factor

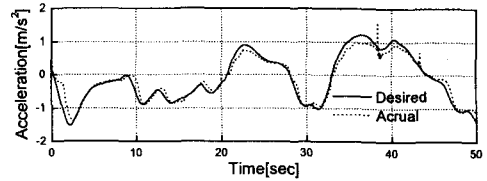


(b) Torque Ratio

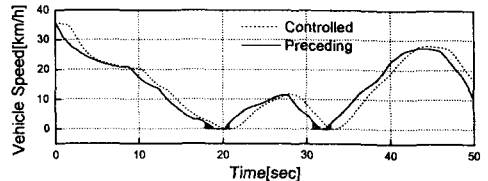
Fig. 9 Torque converter error

스로틀/브레이크 제어시 비례적분(PID) 제어를 포함하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과는 Fig.10 에 나타내었다.

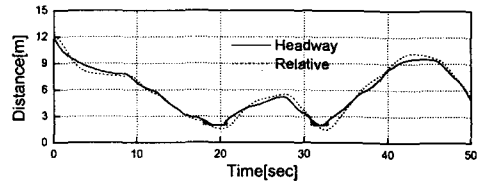
Fig.10 에서 선행차량의 속도 정보는 실제 차량의 저속 주행속도 데이터를 이용하였다.



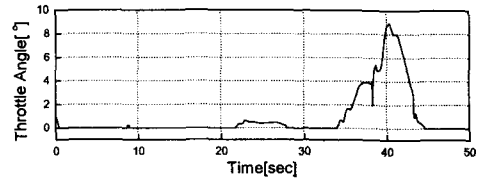
(a) Acceleration



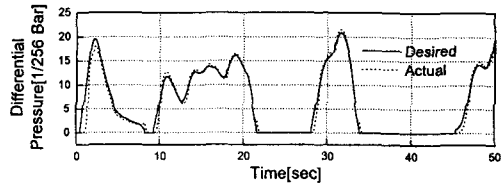
(b) Vehicle Speed



(c) Distance



(d) Throttle angle



(e) Differential pressure

Fig. 10 Stop and Go cruise control without feedforward + PID control

토크 컨버터 에러의 영향으로 Fig.8 에서 구하여 지는 스로틀 각이 계산과정에서 실제 목표되어진 값과 에러가 존재하기 때문에 Fig.10(a)에서 가속 부분의 가속도 오차가 존재하게 된다. 또한 브레이크 응답 지연으로 인해 상대거리가 우리가 목표

하였던 최소거리를 넘어 1.6m 까지 가까워짐을 알 수 있다.

Fig.11 은 Fig.10 과 같은 상황에서 비례적분 제어를 포함한 시뮬레이션 결과이다.

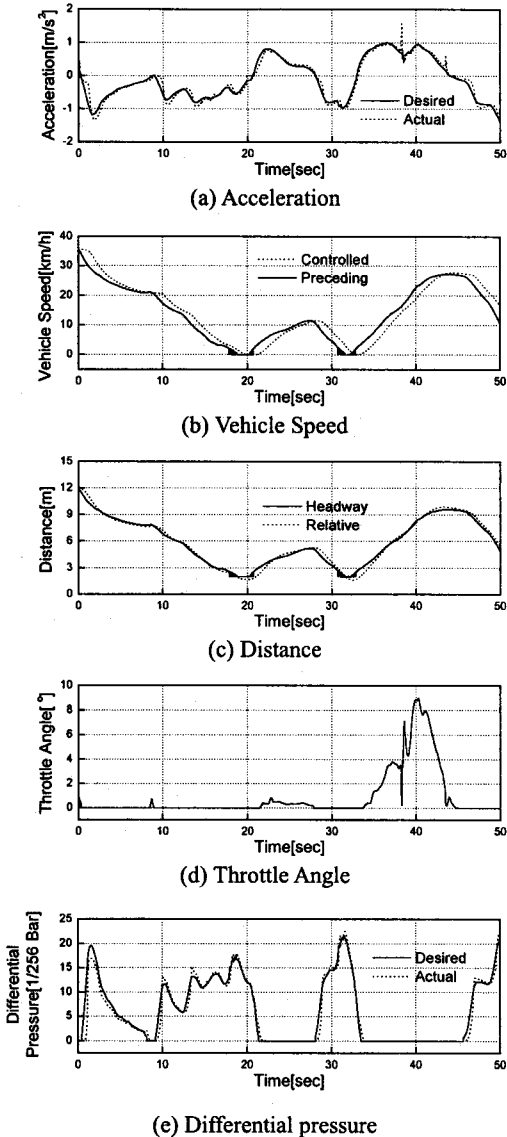


Fig. 11 Stop and Go cruise control with feedforward + PID control

Fig.11(a)의 가속도는 Fig.10 의 결과와 비교해서 가속부분의 오차가 거의 존재하지 않음을 볼 수 있다. 이는 토크 컨버터 에러로 인해 잘못 계산되어지는 스로틀 각에 의해 나타나는 가속도 오차를 비례적분 제어기가 보상하기 때문이다. 또한 선행

차량이 정지했을 때 유지되어야 하는 차간 최소거리는 물론, Fig.11 에서 초기 브레이크 응답 지연으로 인해 나타나는 상대거리와 안전거리의 불일치도 많은 향상을 보여주고 있으며, Fig.11(b)의 선행 차량의 속도 추종에서도 좋은 결과를 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 정지/서행 순항 제어 시스템을 위해 현재 상황에서 선행 차량과의 상대속도, 상대거리, 제어되는 차량 속도를 피드백하여 최적 감/가속도를 설정하는 알고리즘과 스로틀/브레이크 제어를 판단하는 전환 알고리즘, 각 스로틀과 브레이크의 차량 동역학에 기초한 제어 알고리즘을 제안하고 스로틀/브레이크의 응답 지연과 토크 컨버터 데이터 오차를 포함하는 차량 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 제어 알고리즘의 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-007-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) 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
- (2) 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
- (3) Prestl, W., "The BMW Active Cruise Control ACC", SAE paper no. 20000344
- (4) Maciucă, 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.
- (5) 이동현, 장광수, "슬라이딩 모드론 이용한 차량 간격 자동 제어 알고리즘에 관한 연구". 한국자동차공학회 논문집 8 권 2 호, pp92-101, 2000
- (6) 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.
- (7) 송재복, "엔진맵에 기초한 엔진제어 TCS 슬립 제어 알고리즘의 개발" 대한기계학회논문집, 22 권, 2 호, pp.428-436, 1998.2.