

차간 속도/거리제어를 위한 구동력/제동력 통합제어 Throttle/Brake Combined Control for Vehicle-to-vehicle Distance and Speed Control

이 세 진*, 이 경 수**
Sejin Lee, Kyongsu Yi

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. The control performance has been investigated through vehicle tests. The test vehicle is equipped with a MMW radar sensor, a solenoid-valve-controlled Electronic-Vacuum-Booster (EVB) and a step-motor controlled throttle actuator. The results indicate the proposed throttle/brake control laws can provide satisfactory vehicle-to-vehicle distance and velocity control performance.

주요기술용어 : Intelligent cruise control(지능형 순항 제어), Optimal design(최적설계),
Electronic vacuum booster(전자 제어 부스터), Radar sensor(레이다 센서)

1. 서 론

지능형 순항 제어(ICC) 시스템은 운전자의 조작없이 차량을 일정한 속도로 유지하거나 차량의 주행 방향에 있는 장애물이나 차량을 감지하여 일정한 거리를 유지하도록 쓰로틀이나 브레이크를 제어하는 시스템이다. BMW, BENZ에서는 이미 지능형 순항 제어 시스템 개발을 완료하고 운전자의 사용 의견을 분석하고^{1,2)} 있으며 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.^{3,4,5)} 현재 양

산된 지능형 순항제어 시스템은 능동안전의 개념보다는 운전자편의장치의 개념을 담고 있다.¹⁾ 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.⁶⁾ 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 제어성능이 요구된다. 이러한 시스템을 구성하기 위해서는 선행 차량과

* 회원, 한양대학교 자동차공학과대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

의 상대속도와 상대거리를 측정하는 센서와 이를 이용하여 적절한 가속과 감속을 결정하는 제어 알고리즘, 그리고 운전자의 조작없이 작동하는 가속 페달 액추에이터(Throttle actuator)와 브레이크 액추에이터(Brake actuator)가 필요하다. 여기서는 진공 부스터에 별도의 제어 밸브를 추가하여 필요시에 대기압을 부스터로 유입시켜 제동력을 조절/발생시키는 전자제어 부스터를 사용하였고 쓰로틀각을 조절할 수 있도록 스텝모터를 이용하였으며 ICC를 위한 제어 알고리즘을 설계하였다. 많은 연구단체에서 지능형 순항 제어를 위한 알고리즘을 개발하고 있으며 PID와 Fuzzy 방식의 제어기나^{3,7,8,9)} 비선형 제어 방법을^{4,10)} 통한 지능형 순항제어 알고리즘이 소개된 바 있다. 본 연구에서는 가장 중요한 차량의 요소들을 고려한 모델에 기반하여 쓰로틀과 브레이크를 제어하는 알고리즘과 이를 상황에 따라 변화시키는 전환 논리(Switching logic)를 설계하였고, 다양한 실차 실험을 통해 여러 상황에서의 제어성능을 확인하였다.

2. ICC 시스템 구성

지능형 순항 제어 시스템은 운전자가 목표속도와 차간거리를 설정하는 운전자 인터페이스 부분과 앞차와의 상대거리 및 상대속도를 추정하는 밀리미터파 레이더(MMW Radar) 센서, 현재의 상황에서 감/가속을 결정하고 각 쓰로틀/브레이크 액추에이터를 제어하는 컨트롤 유닛, 그리고 각 액추에이터로 구성되어 있으며 Fig.1은 이러한 ICC 테스트 차량의 사진이다.

쓰로틀 액추에이터로는 스텝모터 구동 방식을 사용하였다. 브레이크 액추에이터로서 사용된 전자 제어 부스터(Electronic vacuum booster)는 입력된 PWM 신호의 듀티율(Duty-ratio)에 따라 솔레노이드 밸브에서 힘을 발생시켜 진공 부스터(Vacuum booster)에 차압을 형성시킨다.

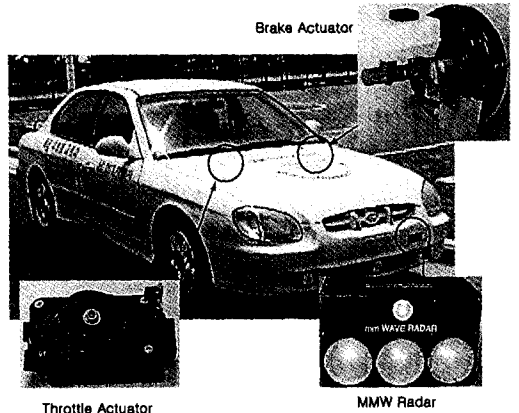


Fig. 1 ICC vehicle

3. 제어기법 설계

Fig.2는 전체적인 ICC제어 시스템의 제어기 설계에 대해 나타낸다. ICC는 운전자가 설정한 속도를 유지하도록 제어하다가 앞차량이 발견되면 더 이상 설정속도를 유지할 수 없는 경우 Headway time의 차간거리를 유지하도록 쓰로틀 또는 브레이크를 제어하게 된다. Headway time거리는 현재 차속과 Headway time의 곱으로 정의된다.

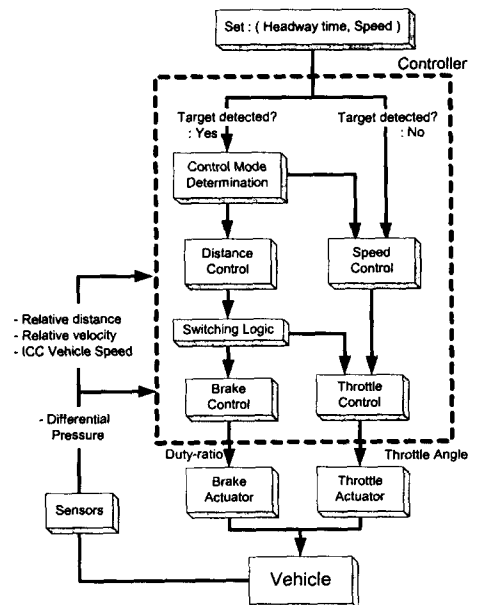


Fig. 2 Schematic of control logic

3.1 목표 감가속도 설계

거리제어를 하는 경우 목표 감가속도를 계산하기 위해서 앞 차량과의 상대속도, 상대거리 그리고 내 차 속도를 피드백하여 최적의 감가속도를 계산하였다. 먼저 상태변수를 식(1)과 같이 정의하고 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= d_r - t_h v_{cc} \\ x_2 &= v_r \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= v_r - t_h a_{cc} = x_2 - t_h u \\ \dot{x}_2 &= \dot{v}_r = \dot{v}_p - \dot{v}_{cc} = -u + w \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, d_r 은 상대거리, v_r 은 상대속도, v_{cc} 는 제어 차량의 속도, v_p 는 선행 차속, 그리고 a_{cc} 는 제어 차량의 감가속도를 나타낸다. 선행 차량의 감가속도는 외란(w)으로 간주된다.

앞차와의 상대거리와 Headway time거리와의 오차인 x_1 과 상대속도 x_2 를 이용하여 다음과 같은 성능 지수(Performance Index)를 정의하였고, 이 값들과 내 차의 감/가속도를 최소화하도록 제어입력, u 를 결정하게 된다.

$$J = \int_0^{\infty} (x_1^2 + \rho_1 \cdot x_2^2 + R_1 \cdot u^2) dt \quad (3)$$

이로부터 최적 계인을 구하여 목표 가속도를 구한다.

$$u = -K \cdot x = -k_1 x_1 - k_2 x_2 \quad (4)$$

설정속도를 유지하는 속도 제어를 하는 경우에는 아래식과 같이 설정속도와 현재 차속의 차이만을 이용하여 목표 가속도를 계산한다.

$$u = -k_3 (v_{set} - v_{cc}) \quad (5)$$

이렇게 계산된 목표 가속도의 최대/최소값에 한계를 두고 저크를 감소하기 위해 2차 필터를 사용하였다.¹¹⁾ 이러한 목표가속도의 계산과정을 Fig.3에 요약하여 나타내었다.

3.2 쓰로틀/브레이크 전환논리

목표감가속도가 결정되면 실제 쓰로틀 제어만

으로 가능한 범위를 Fig.4와 같이 정의할 수 있다. 0.05 m/sec²의 이력현상(Hysteresis) 범위 내에서는 제어를 하지않고 그 이상으로 벗어났을 때 쓰로틀이나 브레이크 제어를 판단하게 된다.

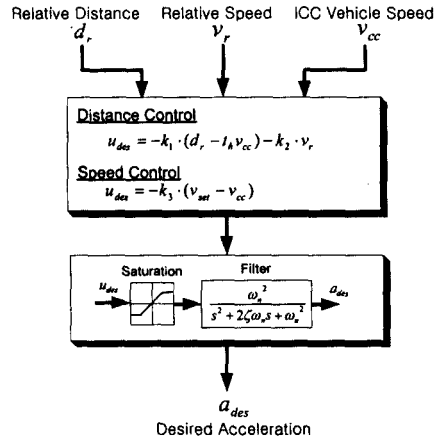


Fig. 3 Calculation of desired acceleration

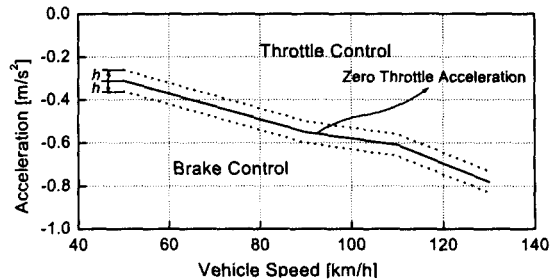


Fig. 4 Switching logic with hysteresis

3.3 쓰로틀 제어(Throttle control)

쓰로틀 제어를 위해 현재 상황에서의 목표 가속도가 계산되어지고 이를 추종하도록 차량동역학에 기반한 쓰로틀각을 계산하고 가속도 오차에 대한 PI제어를 통해 모델오차를 보정한다. 여기서, 실제 가속도는 칼만필터를 사용하여 추정하며 엔진의 토크 형성 지연을 이차필터를 통해 묘사하고 이 가속도를 예상 가속도(a_{pred})로 표시하였다. 예상 가속도와 실제 가속도의 차로부터 PI 제어를 수행하게 된다. 이에 대한 개략도를 Fig.5에 나타내었다. 단순화된 차량의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_v a = \frac{1}{r} (T_s - T_b) - F_L \quad (6)$$

여기서, T_s 는 구동축 토크, T_b 는 총 브레이크 토크, F_L 은 주행부하, r 은 휠반경, M_v 는 차량의 총 무게를 나타낸다.

위식으로부터 목표가속도가 주어졌을 때, 목표 구동축 토크는 다음과 같고,

$$T_{s, des} = r(M_v a_{des} + F_L) \quad (7)$$

이것으로부터 터빈 토크(T_t)를 다음과 같이 정의한다. 이때, R_g 는 기어비, R_d 는 종감속비이다.

$$T_{t, des} = T_{s, des} \times (R_g R_d) \quad (8)$$

이때의 터빈 토크(T_t)를 엔진 토크(T_e)와 크게 차이가 나지 않는 상황이라 가정하고 현재의 엔진 각속도(ω_e)로부터 엔진맵(Engine map)을 이용하여 목표 쓰로틀 각(Desired throttle angle)을 정의한다. 지능형 순항제어의 작동범위에서는 주로 토크 컨버터의 클러치가 락업(Lock-up)되어 있으므로 이 가정은 오차가 없으며 토크 컨버터의 클러치가 락업되지 않은 경우에도 주로 토크컨버터의 펌프와 터빈의 속도비가 1인 영역에서 제어되게 되므로 적절한 가정으로 생각할 수 있다.

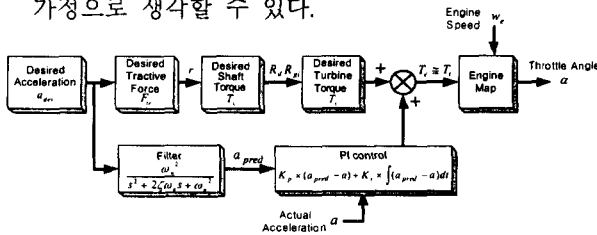


Fig. 5 Throttle controller

3.4 브레이크 제어(Brake Control)

쓰로틀 제어(Throttle control)만으로 목표 감속도(Desired deceleration)가 추종되지 못한 경우, 브레이크 제어가 필요하게 된다. 브레이크 제어의 전체적인 개략도를 Fig.6에 나타내었다. 먼

저, 위에서 구해진 목표 감속도를 추종하도록 차량과 휠의 동역학으로부터 브레이크 토크를 정의하고, 브레이크 토크와 휠 캘리퍼 압력과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_b = K_b \cdot P_w \quad (9)$$

식(9)와 식(6)으로부터 다음과 같이 목표 감속도에 따른 목표 휠 압력을 정의할 수 있다.

$$M_v \dot{v} = -\frac{1}{r} K_b P_w + \frac{1}{r} T_s - F_L \\ \Rightarrow P_{w, des} = \frac{1}{K_b} [-r(M_v a_{des} + F_L) + T_s] \quad (10)$$

식(10)을 쓰로틀을 완전히 닫은 경우의 감속도 a_0 에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{w, des} = \frac{1}{K_b} [-rM_v (a_{des} - a_0)] \quad (11)$$

위에서 목표 휠 압력이 정의되면, 진공부스터(Vacuum booster)의 목표 차압은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{d, des} = \frac{A_{mc}}{A_d} P_{w, des} \quad (12)$$

이 목표 차압을 추종하도록 Feedforward+PI 제어를 통해 듀티율을 다음과 같이 계산한다.

$$u = P_f \times P_{d, des} + P \times (P_{d, des} - P_d) + I \times \int (P_{d, des} - P_d) dt \quad (13)$$

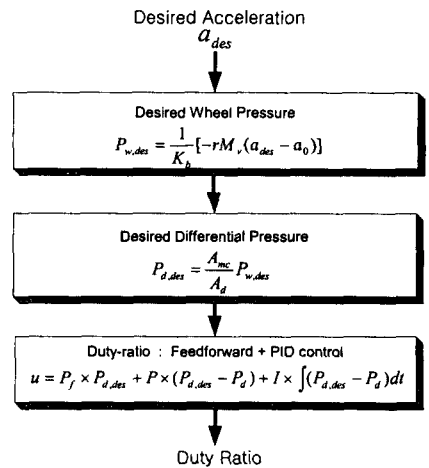


Fig. 6 Brake controller

4. 실험결과

앞에서 설명한 제어로직을 사용하여 여러 상황에서 실차 실험을 수행하였으며 대표적인 결과를 Fig.7과 Fig.8에 나타내었다. 실차실험은 경사가 거의 없는 직선로에서만 수행되었다.

Fig.7은 설정속도를 80 km/h 로 설정하여 주행하고 있는 중에 설정속도를 90km/h로 변경한 경우의 실험결과이다. 즉, 전방에 차량이 없어 설정속도만을 제어하는 경우의 실험결과이다. Fig.7에서 볼 수 있듯이 속도나 가속도 모두 목표치를 제대로 추종하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.8은 설정속도를 110 km/h 로 설정하여 주행하고 있는 중에 90km/h인 차량이 전방 40m의 거리에 끼어든 경우의 실험결과를 나타낸다. 차량이 끼어들자 바로 감속을 시작하여 Headway time거리를 잘 유지하도록 브레이크와 쓰로틀을 잘 제어하고 있음을 볼 수 있다.

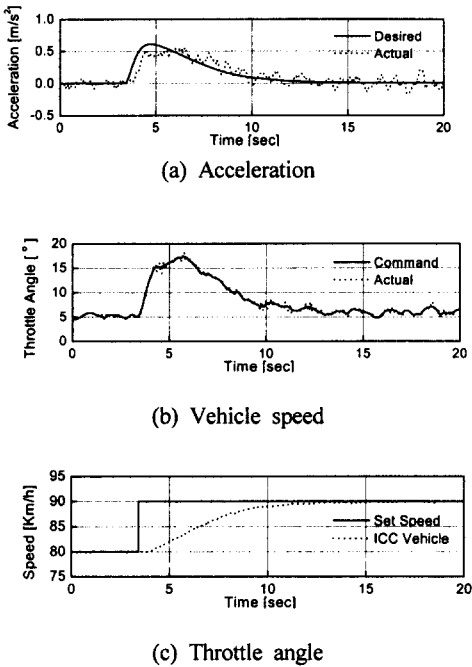


Fig. 7 Set-speed control

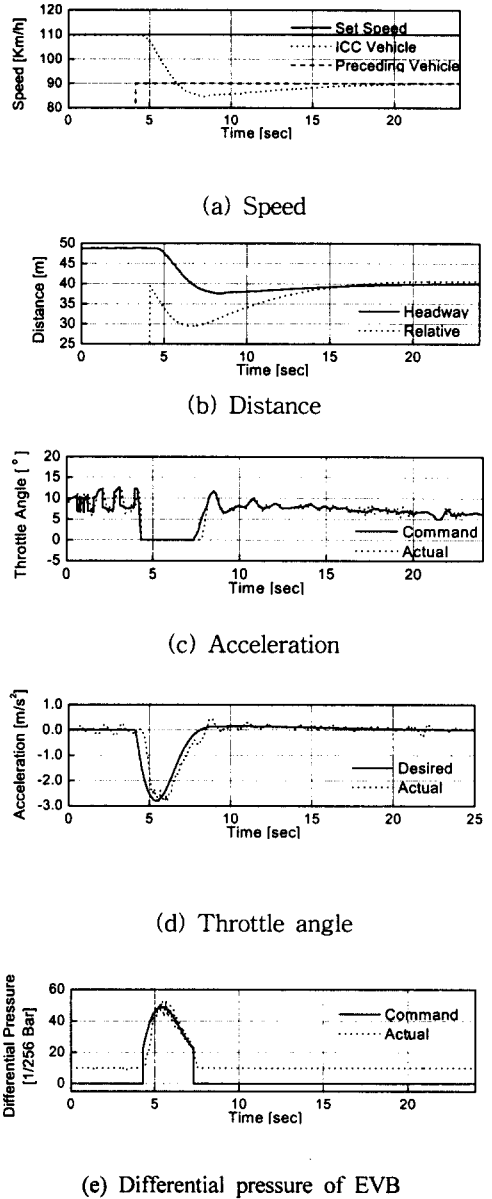


Fig. 8 Cut-in vehicle following

5. 결론

본 연구에서는 지능형 순항 제어를 위한 제어 알고리즘을 설계하였다. 이것은 현재 상황에서 앞 차량과의 상대속도, 상대거리, 내차속도를 피

드백하여 최적 감가속도를 설정하는 알고리즘과 쓰로틀/브레이크 제어를 판단하는 스위칭 알고리즘, 각 쓰로틀과 브레이크의 차량동역학에 기초한 제어 알고리즘을 포함한다. 실차를 이용한 실험을 통해서 제안한 알고리즘의 제어성능을 검증하였다. 주행부하를 고려한 제어기법의 개발이 향후 연구과제이다.

후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) M. Weinberg, H. Winner and H. Bubb, "Adaptive Cruise Control long-term field operational test", Proceeding of AVEC 2000, Ann Arbor Michigan, August 22, 2000.
- 2) H. Winner, S.Wittie. "Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends", SAE 961010.
- 3) 정용복, 송용규, "자동차 지능주행 제어 시스템에 관한 연구", pp.176~187, 한국자동차공학회 논문집, 1995.
- 4) 원문철, 강연준, 강병배, 박문수, 김태영, "트로틀 앵글 제어에 의한 비선형 엔진 제어방법과 차량 간격 제어에의 적용", pp.82-91, 한국자동차공학회 진동,소음,전기,전자 ITS부문 학술강연 초록집, 1998.
- 5) K. Yi, M. Woo, S. Kim and S-C. Lee, "A Study on a Road-Adaptive CW/CA Algorithm for Automobiles Using HiL Simulations", JSME International Journal, Series C, Vol.42, No.1, pp.163-170, 1999.
- 6) X. Y. Lu, S. H. Tan, S. E. Shladover, and J. K. Hedrick, "Implementation of Longitudinal Control Algorithm for Vehicle Merging", Proceeding of AVEC 2000, Ann Arbor Michigan, August 22, 2000.
- 7) C. C. Chien, P. Ioannou and M. C. Lai, "Entrainment and vehicle following controllers design for autonomous intelligent vehicles," Proceedings of the 1994 American Control Conference, pp.6-10, Baltimore, Maryland, June 1994.
- 8) D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "Speed Tracking and Vehicle Follower Control Design for Heavy-duty Vehicles," Vehicle System Dynamics, 25(4):251-276, April 1996.
- 9) Y. Fujioka, M. Aso and J. Baba, "Comparison of Sliding and PID Control for Longitudinal Automated Platooning," Systems and Issues in ITS, pp.61-67, 1995.
- 10) S. Choi and P. Devlin, "Throttle and Brake Combined Control for Intelligent Vehicle Highway Systems," SAE 951897, 1995.
- 11) D.E. Goldman and H. E. von Gierke, "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill Book Company, 3rd edition, Chapter 44, 1988.