

Design of a Robust Adaptive Control Scheme for Longitudinal Motion of Vehicles

金 東 憲* · 梁 海 元**

(Dong-Hun Kim · Hai-Won Yang)

Abstract - A robust adaptive technique for the longitudinal control of a platoon of automated vehicles is presented. A nonlinear model is used to represent the dynamics of each vehicle within the platoon. The external disturbances such as wind gust and a disturbance term due to engine transmission variations and so on are considered. The state observer is used to avoid direct measurement of the relative velocity or acceleration between the controlled and leading vehicles or the controlled vehicle's acceleration. The proposed controller guarantees to recover platoon stability in operation even if a speed dependent spacing policy is adopted, which incorporates a constant time headway in addition to the constant distance. It is shown that the proposed observer is exponentially stable, and that the robust adaptive controller is stable. The simulation results demonstrate excellent tracking even in the presence of disturbances.

Key Words : 직선주행 제어, 적응칙, 관측자, 강인적응 제어기

1. 서 론

차량의 Longitudinal(이하 직선주행) 제어는 첨단차량 제어시스템 구현문제에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 이에 대한 기본적인 제어기술이 적응순항제어(Adaptive Cruise Control), 충돌방지제어(Collision Avoidance Control), 교통제어(Traffic Control) 등에도 적용될 수 있기 때문이다. 차량의 직선주행 제어시스템의 구현 시 중요한 요소기술로 센서융용기술, 시스템 제어기술을 들 수 있다. 이 가운데 해당차량과 선행차량 간의 상대거리, 상대속도 및 상대가속도를 원하는 값으로 정확히 제어하는 것은 차량의 가감속 운동특성(동력계 및 제동계 동특성)을 감안할 때 응답성이 비교적 느린 시스템의 제어문제로 간주할 수 있다. 즉, 스로틀(throttle)입력이 엔진출력에 반영된 후 차량의 추력으로 변환되기까지 소요되는 시간이 비교적 느리다고 할 수 있다. 또한 제동장치로부터의 제동력이 차량 추력에 영향을 미치는 시간 또한 빠르다고 할 수 없다. 이와 같이 제어입력에 대한 출력 특성이 느린 시스템을 효과적으로 빠르게 제어하기 위해서는 시스템의 속응성을 향상시킬 수 있는 정밀하면서도 안정적인 제어알고리즘이 필요하다. [1]에서는 분산화된 비선형 시스템에 대한 적응제어알고리즘을 제시함으로써 차량주행제어에도 효과적임을 보였다. [2]~[7]에서는 차량 시스템의 동특성 및 파라미터를 정확히 알고 있는 상태에서 설계된 제어방법을 제시하여 효과적인 결과를 얻을

수 있음을 보이고 있다. [8]에서는 차간거리 측정장치의 오차를 보상하기 위하여 적응거리관측자(Adaptive Distance Observer)를 제시하여 추종주행 제어기 설계시 효과적으로 이용하고 있다.

본 논문에서는 차량의 직선 주행 운동을 제어하기 위하여 관측자를 이용한 강인 적응제어기를 설계한다. 선행차량과 추종 차량간의 안전거리는 선행 차량의 속도에 따라 적절한 안전거리를 유지하는 캘리포니아 규칙[9]을 사용하며, 바람이나 엔진 트랜스미션 변화에 따른 외란 요소를 보상하기 위하여 강인제어 기법을 사용하며, 적응칙을 이용하여 차량 파라미터(질량, 엔진시정수 등)를 추정한다. 차량의 추력에서부터 주행가속도까지를 입출력으로 간주한 비선형 모델을 차량 속도 및 가속도 관측자 설계에 이용한다. 전체 시스템의 안정도를 보장하며 선행 차량에 대한 추종특성이 보장될 수 있음을 수학적으로 입증하며, 차간 거리, 속도 및 가속도가 원하는 값으로 유지될 수 있음을 보인다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 선행차량을 포함한 4대의 자동차에 대하여 수학적으로 입증된 본 제어기의 효용성을 확인하기로 한다. 본문은 제2장에서 제어모델 및 해결하려는 문제를 정식화하며, 제3장에서 강인 적응제어기의 설계 문제 및 수학적 안정도 입증에 대해 다루고, 제4장에서는 제시된 제어기의 타당성 보안을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 검토하고 제5장에서 결론을 맺도록 구성되어 있다.

2. 제어모델 및 문제의 정식화

도로는 수평이고, 모든 차량은 동일한 방향으로만 주행한다고 가정하자. 뉴턴의 제 2법칙으로부터 i 번째 자동차의 가속도와 자동차의 추진력, 자동차에 가해지는 기계저항에 의해 구해지는 동특성은 다음과 같다[10].

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 電子·컴퓨터 工學部 教授·工博

接受日字 : 2000年 9月 25日

最終完了 : 2000年 12月 29日

$$m_i \ddot{x}_i = f_i - A_{\rho i} \dot{x}_i^2 - d_m + d_w(t) \quad (1)$$

여기서, $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ 는 각각 i 번째 자동차의 위치, 속도, 가속도이고, f_i 는 추진력이며, m_i 는 i 번째 자동차의 질량이며, $A_{\rho i} \dot{x}_i^2$ 은 공기저항에 기인하는 힘으로 $A_{\rho i}$ 는 공기저항계수에 관한 상수이고, d_m 는 기계저항(mechanical drag)에 관한 상수이다. $d_w(t)$ 는 바람 혹은 돌풍과 같은 외부의란에 의한 성분이다.

자동차의 엔진 다이내믹스를 표현하는 추진 시스템은 다음과 같은 1차 비선형 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{f}_i = \frac{1}{\tau_i} (-f_i + u_i) + d_{2i}(t) \quad (2)$$

여기서, τ_i 는 i 번째 자동차가 \dot{x}_i 의 속도로 주행하고 있을 때, i 번째 자동차의 엔진 시정수를 나타내며, $d_{2i}(t)$ 는 엔진 트랜스미션 변화에 의한 외란이며, u_i 는 양수(>0)일 경우에는 스로틀 개도(throttle opening)이고 음수(<0)일 경우에는 제동력이다. 식(1),(2)에서 $m_i, A_{\rho i}, \tau_i$ 는 미지의 값이다.

위에서 설명된 직진 주행차량은 그림 1처럼 표현될 수 있고, 이 모델은 자동차 군집 주행제어를 위해 [11]에서 이용되었으며, AICC(Autonomous Intelligent Cruise Control) 시스템을 설계하기 위해 [10][12]에서도 이용되었다.

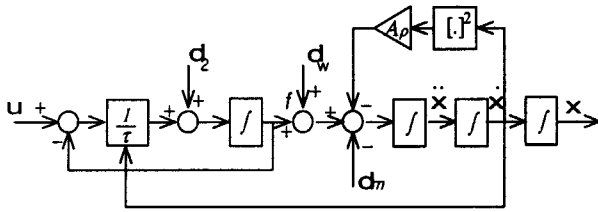


그림 1 직진 주행차량 모델
Fig. 1 Longitudinal Vehicle Model

안전한 직진주행운전을 위해 후위차량은 선두차량으로부터 안전한 거리를 유지하여야 한다. 교통운행 관점에서 보면, 바람직한 안전거리는 가능한 한 작아야 한다. 하지만 자동차의 성능과 탑승자의 편안한 안전거리 느낌, 그밖의 다른 안전요소 고려 등에 의해 최소 안전거리는 다른 형태로 정의되어야 한다.

i 번째 자동차의 바람직한 안전거리 규칙[12]은 다음과 같다.

$$S_{di} = \alpha(v_i^2 - v_{i-1}^2) + \rho v_i + L \quad (3)$$

여기서, $v_i = \dot{x}_i$ 는 i 번째 자동차의 속도이며, α, ρ, L 은 사람의 운전동작 반응시간, 자동차의 최대 가속, 감속 등을 고려한 양의 상수이다. 자동차 주행이 정상상태 동작으로 이루어지고 있으면, 후위차량의 속도는 선두차량의 속도와 거의 같다. 따라서, 안전거리 규칙은 다음과 같이 근사화 된다.

$$S_{di} = \rho v_i + L \quad (4)$$

식(4)를 일정시간 진행규칙(constant time headway policy)이라고 하며, 본 논문에서는 이 규칙을 이용한다. 식(4)는 선행차량과 후위차량간의 안전거리를 선행 차량의 속도에 따라 후위차량이 적절한 안전거리를 유지하는 것으로

선행차량이 속도가 빠르면 안전거리가 길어지고 선행차량이 속도가 느리면 안전거리가 짧아진다. 또한, 선행차량이 정지하면 최소거리 L 만큼의 거리를 유지한다. 시간진행 상수(time headway constant) ρ 가 크면 선행차량의 속도에 더 많은 비중을 두어 안전거리규칙이 정해진다. $\rho=0.9$ 이면, 속도가 10 m.p.h.일 때 자동차 한 대 정도의 안전거리를 유지하며 이를 캘리포니아 규칙[1][9]이라 한다.

그림 2처럼 안전거리 규칙으로부터 i 번째 자동차와 $i-1$ 번째 자동차와의 거리간격은 다음과 같다.

$$y_{pi} = \psi_i + L + \rho v_i \quad (5)$$

여기서, $\psi_i = (x_i + l_i) - x_{i-1}$. $L + \rho v_i$ 는 선행차량의 속도에 따라 적합하게 변하는 선행차량과 후위차량의 안전거리를 나타내고, $-y_{pi}$ 는 오차거리를 나타내며, $-\psi_i$ 는 실제 선행차량과 후위차량의 거리를 나타낸다. (-) 기호의 의미는 선행차량에서 안전거리 $L + \rho v_i$ 를 기준으로 본 후위차량의 거리를 의미한다.

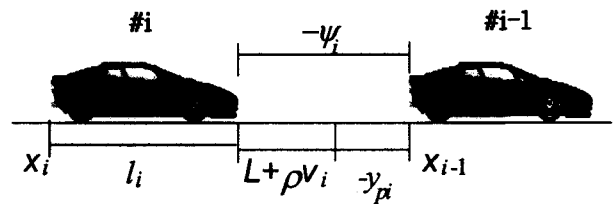


그림 2 추종 주행시의 차량열.
Fig. 2 Platoon of vehicles.

식(1)의 제어모델을 이용할 경우 차량의 속도 \dot{x}_i 및 가속도 \ddot{x}_i 를 정확히 알아야 할 필요가 있다. 또한 질량 m_i 는 탑승자 수 및 적재물의 변동에 따라 그 값이 주행시마다 달라질 수 있다. 그리고 엔진시정수라 할 수 있는 $\tau_i(x_i)$ 는 주행 속도에 비례해 변화하는 값이다. 따라서 본 논문에서는 속도 및 가속도 \dot{x}_i, \ddot{x}_i 를 상태관측자를 이용하여 추정하고, 질량 m_i 및 엔진 시정수 $\tau_i(x_i)$ 에 의존적인 시스템 파라미터는 적응치를 이용하여 추정하기로 한다. 제어기 설계시 필요한 정보는 추정된 상태 및 파라미터들을 이용함으로써 얻을 수 있다. 식(1)(2)의 외란 $d_w(t), d_{2i}(t)$, 즉 바람이나 돌풍에 의한 외란, 트랜스미션 변화에 의한 외란효과는 강인제어 기법을 이용하여 상쇄시키고 선행차량의 속도에 알맞은 안전거리를 유지하게 하는 것이 본 논문의 목적이다. 또한 궤환선형화 방식의 제어기를 설계하여 전체 시스템의 안정도가 보장되고, 차량간의 상대거리, 상대속도 및 상대가속도 오차가 빠른 시간내에 '0'으로 수렴하도록 한다. 궤환 선형화 기법은 원래의 시스템 모델을 등가의 단순한 모델로 변환시키는데 사용하는 제어기법이며, 비선형 시스템 모델을 선형 시스템 모델로 변환시킨 후 잘 알려져 있는 선형 제어 기법 등을 사용한다.

3. 제어목적과 설계

3.1 제어목적

i 번째 자동차의 동역학식은 상태 벡터 $X_i = [\psi_i, v_i, f_i]^T$

로 표현된다. 이와 같이 상태벡터를 선택하면 식(1),(2)는 다음과 같다[10].

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_i &= v_i - v_{i-1} \\ \dot{v}_i &= \frac{1}{m_i}(-A_{pi}v_i^2 - d_{mi} + d_{ui}(t) + f_i) \\ \dot{f}_i &= \frac{1}{\tau_i}(-f_i + u_i) + d_{2i}(t) \text{ for } 1 \leq i \leq N \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, N 은 추종주행 하는 자동차의 수이다. 제어목적은 제어입력 u_i 를 설계해서 차간간격 ϕ_i 가 원하는 궤적을 따라가도록 하는 것이다. 즉 식(5)에서 y_{pi} 가 0을 따라가도록 하는 것이다.

3.2 상태 관측자 설계

상태 관측자를 설계하여 속도 및 가속도 v_i, \ddot{x}_i 를 추정하기로 한다. 속도 v_i 는 차량의 속도계로부터 직접 알 수 있으므로 추정할 필요는 없다. 하지만 제어기 설계시 실측값보다 추정값을 사용하는 것이 잡음 등에 유리하다. 따라서 본 논문에서는 관측자 설계에는 속도 v_i 를 이용하고, 제어기 설계시에는 추정치를 이용하기로 한다. 구조를 단순화하기 위해 식(1)의 모델을 상태관측자 설계에 이용하기로 한다. 식(1)을 파라미터화 기법으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= \frac{1}{m_i}(-A_{pi}v_i^2 - d_{mi} + f_i) + d_{1i}(t) \\ &= P_i^T Y_{0i} + d_{1i}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $d_{1i}(t) = \frac{d_{ui}(t)}{m_i}$ 이다. $P_i^T = \left[\frac{1}{m_i} \quad -\frac{A_{pi}}{m_i} \quad -\frac{d_{mi}}{m_i} \right]$ 로 파라미터 벡터이고, $Y_{0i}^T = [f_i \quad v_i^2 \quad 1]$ 로 측정치 벡터이다. 식(7)의 모델에 대하여 아래의 관측자를 설계한다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_i &= -b_i(\hat{v}_i - v_i) + \bar{P}_i^T Y_i - \xi_i S(\hat{v}_i) - \eta_{di} \\ S(\hat{v}_i) &= \begin{pmatrix} 1, & \hat{v}_i > 0 \\ -1, & \hat{v}_i < 0 \end{pmatrix}, \xi_i \geq \|\bar{P}_i^T Y_i - P_i^T Y_{0i}\|_\infty \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $Y_i^T = [f_i \quad v_i^2 \quad 1]$ 이며, b_i 는 양의 상수로서 관측자 이득이고, \bar{P}_i^T 는 파라미터 벡터 P_i^T 의 사전 설정치이다. 그리고 $\|\cdot\|_\infty$ 는 L_∞ norm이며, $\hat{v}_i = \hat{v}_i - v_i$ 는 속도추정 오차이다. P_i^T 의 정확한 값은 알 수 없지만 \bar{P}_i^T 와의 차이에 대한 상한값은 미리 알 수 있는 값이다. $\eta_{di} = \bar{d}_{1i} \text{sgn}(\hat{v}_i)$, \bar{d}_{1i} 는 $|d_{1i}(t)|$ 의 상한값이다. 그리고 측정치 벡터 Y_i 의 요소중 v_i^2 의 최대값은 제어기 설계자가 미리 알 수 있는 값이며, f_i 에 대한 상대적인 유계성을 보장하기 위해 다음의 보조신호를 설계한다.

$$f_{ui} = -\frac{f_{ui}}{\tau_{ui}} + \frac{\|u_i\|_\infty}{\tau_{ui}} + \bar{d}_{2i} \quad (9)$$

여기서, \bar{d}_{2i} 는 $|d_{2i}(t)|$ 의 상한값이고, τ_{ui} 는 설계파라미터로서 $0 < \tau_{ui} < \tau_i$ 를 만족하도록 설정한다. 그러면, 다음의 보조정리가 성립한다.

보조정리 1 : 초기시간 $t = t_0$ 에서 $f_{ui}(t_0) > |f_i(t_0)|$ 이 성립하고, 모든 시간 $t \geq t_0$ 에 대해서 $0 < \tau_{ui} < \tau_i$ 이 만족하도록 f_{ui} 와 τ_{ui} 를 설정한다면, $f_{ui} > |f_i|, \forall t \geq t_0$ 가 성립한다.

증명: 식(2)로 주어진 미분방정식의 해는 다음의 부등관계를 만족한다.

$$|f_i| \leq |f_i(t_0)|e^{-(t-t_0)/\tau_i} + \frac{1}{\tau_i} \int_{t_0}^t e^{-(t-\tau)/\tau_i} (\|u_i\|_\infty + \tau_{ui} \bar{d}_{2i}) d\tau. \quad (10)$$

그리고, 식(9)의 미분방정식의 해는

$$f_{ui} = f_{ui}(t_0)e^{-(t-t_0)/\tau_{ui}} + \frac{1}{\tau_{ui}} \int_{t_0}^t e^{-(t-\tau)/\tau_{ui}} (\|u_i\|_\infty + \tau_{ui} \bar{d}_{2i}) d\tau \quad (11)$$

이 된다. 식(11)에서 $f_{ui}(t_0) > |f_i(t_0)|$ 및 $e^{-(t-t_0)/\tau_{ui}} > e^{-(t-t_0)/\tau_i}, \forall t \geq t_0$ 이 성립하므로 $f_{ui} > |f_i|, \forall t \geq t_0$ 가 만족됨을 알 수 있다.

따라서 식(8)의 $\|Y_i\|_\infty$ 를 구현할 수 있으며, $\xi_i \geq \|\bar{P}_i^T - P_i^T\|_\infty \|Y_i\|_\infty$ 또한 구현할 수 있음을 알 수 있다. 식(8)과 같이 설계한 상태관측자의 오차 수렴성은 다음의 정리를 만족한다.

보조정리 2: $b_i > 0$ 를 만족하는 식(8)의 상태관측자의 이득상수 b_i 에 대해 상태관측오차는 지수함수적으로 '0'으로 수렴한다. 즉, $\hat{v}_i \rightarrow 0, \hat{v}_i \rightarrow 0, \forall t \geq t_0$ 이 만족된다.

증명: 식(8)에서 식(7)을 빼면 다음의 상태오차 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}}_i &= \hat{v}_i - \dot{v}_i = -b_i \hat{v}_i + \bar{P}_i^T Y_i - P_i^T Y_{0i} - \xi_i S(\hat{v}_i) \\ &\quad - d_{1i}(t) - \eta_{di} \end{aligned} \quad (12)$$

이제 Lyapunov 함수후보를 $V_{0i} = \frac{1}{2} \hat{v}_i^2$ 로 설정한다. 그러면 1계 도함수는 다음의 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{0i} &= \hat{v}_i \dot{\hat{v}}_i = -b_i \hat{v}_i^2 + \bar{P}_i^T Y_i \hat{v}_i - P_i^T Y_{0i} \hat{v}_i - \xi_i S(\hat{v}_i) \hat{v}_i \\ &\quad - (d_{1i}(t) + \eta_{di}) \hat{v}_i \\ &\leq -b_i \hat{v}_i^2 + \|\bar{P}_i^T Y_i - P_i^T Y_{0i}\|_\infty |\hat{v}_i| - \xi_i S(\hat{v}_i) \hat{v}_i \\ &\leq -b_i \hat{v}_i^2 = -2b_i V_{0i} \end{aligned} \quad (13)$$

즉, V_{0i} 는 지수함수적으로 안정(exponentially stable)하다. 따라서 $V_{0i}, \dot{V}_{0i}, \hat{v}_i, \dot{\hat{v}}_i$ 는 모두 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴한다. 즉, $V_{0i} \rightarrow 0, \dot{V}_{0i} \rightarrow 0$ 및 $\hat{v}_i \rightarrow 0, \dot{\hat{v}}_i \rightarrow 0, \forall t \geq t_0$ 이 만족된다.

3.3 강인 적용 제어기 설계

식(5)의 y_{pi} 를 두 번 미분하고, 식(6),(7)을 이용하면 다음과 같다.

$$y_{pi}'' = \theta_i^T (F_i + G_i u_i) + \Delta_i - \dot{v}_{i-1} \quad (14)$$

여기서, $\theta_i = [-\frac{d_{mi}}{m_i} \quad -\frac{A_{pi}}{m_i} \quad -\frac{2A_{pi}\rho}{m_i} \quad \frac{1}{m_i} \quad -\frac{\rho}{m_i\tau_i}]^T$,
 $F_i = [1 \quad v_i^2 \quad v_i \dot{v}_i \quad f_i \quad f_i]^T$, $G = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1]^T$.

$$\Delta_i = d_{1i}(t) + \rho(d_{1i}(t) + \frac{d_{2i}(t)}{m_i}).$$

제어입력은 궤환 선형화 기법을 사용하여 다음과 같이 설계한다.

$$u_i = \frac{-\hat{\theta}_i^T \hat{F}_i + \nu_{1i} + \nu_{2i}}{\hat{\theta}_i^T G} \quad (15)$$

여기서, $\hat{F}_i = [1 \quad \hat{v}_i^2 \quad \hat{v}_i \quad \hat{v}_i \quad f_i \quad f_i]^T$, $\nu_{1i} = \ddot{y}_{mi} + a_{0i}e_{0i} + a_{1i}\dot{e}_{0i}$ 이고 ν_{2i} 는 뒤에서 설계하기로 한다. ν_{1i} 는 시스템의 안정화를 위해 설계하는 제어 입력이며, ν_{2i} 는 바람 혹은 돌풍과 같은 외부외란과 엔진 트랜스미션 변화에 의한 외란 성분을 소거하기 위해 설계하는 제어 입력이다.

식(15)를 식(14)에 넣어 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i^T G \ddot{y}_{pi} &= \theta_i^T (F_i - \hat{F}_i) + \hat{\theta}_i^T G + \hat{\theta}_i^T G (\Delta_i - \dot{v}_{i-1}) \\ &\quad + \theta_i^T G (\nu_{1i} + \nu_{2i}) \end{aligned} \quad (16)$$

오차식은 다음과 같고 $y_{pi} \rightarrow 0$ 으로 만드는 것이 목적이므로 $y_{mi} = 0$ 으로 설정한다.

$$e_{0i} = y_{mi} - y_{pi} = -y_{pi} \quad (17)$$

식(17)을 두 번 미분하여 식(16)을 사용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{e}_{0i} &= (\hat{\theta}_i^T - \theta_i^T)(F_i + Gu_i) - a_{0i}e_{0i} - a_{1i}\dot{e}_{0i} - (\Delta_i - \dot{v}_{i-1}) \\ &\quad - \nu_{2i} - (\hat{\theta}_i^T - \theta_i^T)(F_i - \hat{F}_i) \\ &= (\hat{\theta}_i^T - \theta_i^T)(\hat{F}_i + Gu_i) - a_{0i}e_{0i} - a_{1i}\dot{e}_{0i} - (\Delta_i - \dot{v}_{i-1}) \\ &\quad - \nu_{2i} \end{aligned} \quad (18)$$

오차 벡터를 $e_i = [e_{0i} \quad \dot{e}_{0i}]^T$ 로 정의하여 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\dot{e}_i = \Lambda_i e_i + b_i [(\hat{\theta}_i^T - \theta_i^T)(\hat{F}_i + Gu_i) - (\Delta_i - \dot{v}_{i-1}) - \nu_{2i}] \quad (19)$$

여기서, $\Lambda_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_{0i} & -a_{1i} \end{bmatrix}$, $b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

$\hat{\theta}$ 의 적응칙은 다음과 같이 설계한다.

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma(\hat{F}_i + Gu_i)e_i^T P b_i \quad (20)$$

Lyapunov 함수후보를 $V_{1i} = e_i^T P e_i + \hat{\theta}_i^T \Gamma^{-1} \hat{\theta}_i$ 로 설정한다.

여기서, $\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$.

V_{1i} 에 미분을 취해 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1i} &= e_i^T (P \Lambda_i + \Lambda_i^T P) e_i + 2 \hat{\theta}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}}_i + 2 e_i^T P b_i \\ &\quad \cdot [\hat{\theta}_i^T (\hat{F}_i + Gu_i) - (\Delta_i - \dot{v}_{i-1}) - \nu_{2i}] \\ &= -e_i^T R e_i + 2 \hat{\theta}_i^T (\Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}}_i + (\hat{F}_i + Gu_i) e_i^T P b_i) \\ &\quad - 2 e_i^T P b_i (\nu_{2i} + \Delta_i - \dot{v}_{i-1}) \\ &= -e_i^T R e_i - 2 e_i^T P b_i (\nu_{2i} + \delta_i) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $\delta_i = \Delta_i - \dot{v}_{i-1}$.

바람 혹은 돌풍의 요소는 불연속 하지 않고 한계가 있는 값이며, 미분값 역시 마찬가지로 엔진 트랜스미션 변화에 의한 외란 성분 역시 유제한 값이다[1]. 가속도 또한 자동차가

낼수 있는 한계가 있는 값이므로 ν_{2i} 를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\nu_{2i} = \beta_i \text{sgn}(e_i^T P_i b_i) \quad (22)$$

여기서 $\beta_i \geq |\delta_i|$. 만약 β_i 를 δ_i 보다 충분히 큰 값으로 설정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1i} &= -e_i^T R_i e_i - 2[\beta_i |e_i^T P_i b_i| + \delta_i e_i^T P_i b_i] \\ &\leq -e_i^T R_i e_i \end{aligned} \quad (23)$$

3.3.1 강인제어기 설계 방법1

식(22)의 β_i 를 추정하기 위하여 Lyapunov 함수후보를

$V_{2i} = V_{1i} + \frac{1}{2\lambda} \hat{\beta}_i^2$ 로 설정한다. 여기서, $\hat{\beta}_i = \hat{\beta}_i - \beta_i$. ν_{2i} 와 $\hat{\beta}_i$ 를 다음과 같이 설계한다.

$$\nu_{2i} = \hat{\beta}_i \text{sgn}(e_i^T P_i b_i) \quad (24)$$

$$\hat{\beta}_i = \begin{cases} 2\lambda |e_i^T P_i b_i| & , \text{if } \hat{\beta}_i \leq \bar{\beta}_i \\ 2\lambda [1 + \frac{\bar{\beta}_i - \hat{\beta}_i}{\delta}] |e_i^T P_i b_i| & , \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

여기서, δ 는 양의 상수이며, $\bar{\beta}_i$ 는 β_i 값보다 적당히 큰 양의 상수로 설정한다. 그러면 식(25)의 두 경우 모두에 대하여 식(26)이 성립한다. 식(25)는 $\hat{\beta}_i$ 가 임의의 어떤 값을 넘지 않도록 일반적인 적응칙을 수정한 형태이다. 식(21), (24), (25)를 이용하여 부등식을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} &\leq -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i |e_i^T P_i b_i| + 2\beta_i |e_i^T P_i b_i| + \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \dot{\hat{\beta}}_i \\ &= -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i |e_i^T P_i b_i| + 2(\hat{\beta}_i - \beta_i) \\ &\quad \cdot |e_i^T P_i b_i| + \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \dot{\hat{\beta}}_i \\ &= -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i |e_i^T P_i b_i| + \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \dot{\hat{\beta}}_i \\ &\leq -e_i^T R_i e_i \end{aligned} \quad (26)$$

식(26)을 사용하여 e_i , $\hat{\theta}_i$, $\hat{\beta}_i$ 모두 유계함을 보였다. 또한, 식(22)의 ν_{2i} 도 유계하고, $\hat{\theta}_i$ 가 유계해서 식(15)의 제어입력 u_i 가 유계하여 제안된 알고리즘에 사용된 모든 신호가 유계임을 알 수 있다. (26)을 적분하여 전개하면,

$$\begin{aligned} \int_0^t e_i^T(\tau) R e_i(\tau) d\tau &\leq -V_{2i}(t) + V_{2i}(0) \leq V_{2i}(0) \\ &= e_i^T(0) R e_i(0) + \hat{\theta}^T(0) \Gamma^{-1} \hat{\theta}(0) + \frac{1}{2\lambda} \hat{\beta}_i^2(0) \end{aligned} \quad (27)$$

따라서, $e_i \in L_2$. 식(19)로부터 $\dot{e}_i \in L_\infty$. Barbalat의 보조정리 [13]를 이용하면 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0$ 를 얻는다. 그러므로, 선행차량의 속도에 알맞는 안전거리 유지에 대하여 점근적 안정도를 보장할 수 있다.

3.3.2 강인제어기 설계 방법2

식(24)를 사용하면 제어입력과 응답에 채터링이 생기므로 이를 막기 위해 다음과 같이 설계한다.

$$\nu_{2i} = \hat{\beta}_i \frac{e_i^T P_i b_i}{|e_i^T P_i b_i| + \sigma} \quad (28)$$

여기서 σ 는 양수이다. 식(23)에 부등식을 취하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{2i} &\leq -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i \frac{(e_i^T P_i b_i)^2}{|e_i^T P_i b_i| + \sigma} \\
 &\quad + 2\beta_{i1} |e_i^T P_i b_i| - \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \hat{\beta}_i \\
 &= -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i \frac{(e_i^T P_i b_i)^2}{|e_i^T P_i b_i| + \sigma} \\
 &\quad + 2(\hat{\beta}_i - \beta_{i1}) |e_i^T P_i b_i| - \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \hat{\beta}_i \\
 &= -e_i^T R_i e_i - 2\hat{\beta}_i \left[\frac{(e_i^T P_i b_i)^2}{|e_i^T P_i b_i| + \sigma} - |e_i^T P_i b_i| \right] \\
 &\quad - 2\beta_{i1} |e_i^T P_i b_i| - \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \hat{\beta}_i \\
 &= -e_i^T R_i e_i + \varepsilon - 2\hat{\beta}_i |e_i^T P_i b_i| - \frac{1}{\lambda} \hat{\beta}_i \hat{\beta}_i \\
 &= -e_i^T R_i e_i + \varepsilon \tag{29}
 \end{aligned}$$

여기서, $\varepsilon = -2\hat{\beta}_i \left[\frac{(e_i^T P_i b_i)^2}{|e_i^T P_i b_i| + \sigma} - |e_i^T P_i b_i| \right]$ 이다.

목적제적오차의 상한값 ε_0 를 사용하여 다음과 같은 오차 집합을 정의한다.

$$E_0 = \{e_i : \|e_i\| < \varepsilon_0\} \tag{30}$$

그러면, 식(31)을 만족하는 최소 고유치 $\lambda_{\min}(R)$ 이 존재한다. ε_0 은 사용자 설정 파라미터이다.

$$\lambda_{\min}(R) \geq \frac{\varepsilon + c_1}{\varepsilon_0^2} \tag{31}$$

여기서, c_1 은 양수이다. 식(31)을 식(29)에 넣으면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{2i} = -e_i^T R_i e_i + \varepsilon \leq -c_1, \quad \forall e_i \in R^n - E_0 \tag{32}$$

따라서, $e_i, \hat{\theta}_i, \hat{\beta}_i$ 는 다음과 같은 잔여집합에 점근적으로 수렴한다.

$$D = \{e_i, \hat{\theta}_i, \hat{\beta}_i : e_i^T R_i e_i \leq \varepsilon\} \tag{33}$$

4. 모의실험

이제까지의 해석적인 결과에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 보완하기로 한다. 시뮬레이션에서는 3대의 차량이 군집 주행을 하는 것으로 설정하였다. 제어목적은 실제 차간 간격 $-\psi_i$ 가 안전거리 $L + \rho v_i$ 와 같도록 즉, 식(5)의 $y_{pi} = \psi_i + L + \rho v_i$ 가 0이 되도록 제어 입력 u_i 를 설계한다. 차량별 파라미터는 [2]에서 시뮬레이션 수행시 사용한 값들로서 아래의 표 1.에 나타내었다. 3대의 차량이 동일한 방향으로 직선주행을 하는 것으로 간주하고 시뮬레이션을 수행하였다. 선두 차량은 Daihatsu Charade CLS 이고, 그 뒤를 Buick Regal Custom 이 추종하며, 맨 뒤에서 BMW 750iL 이 추종하는 것으로 하였다. 각 차량의 승차인원 및 무게는 Daihatsu Charade CLS 에 91[Kg] 3명, Buick Regal Custom 에 64[Kg] 2명, BMW 750iL에 각각 45, 45, 91, 59 [Kg] 4명이다. 강인제어 입력 식(28)은 식(24)의 채터링을 막기위한 방법일 뿐 응답에 있어서는 식(24)의 방법과 그다지 크게 다르지 않다. 따라서, 모의 실험은 강인제어기 설계 방법1을 사용하기로 한다. $\rho = 0.9$ 일때의 캘리포니아 규칙으로 안전거리 규격을 정하고 모의 실험한 경우이다. 선두

차량의 속도와 가속도 궤적은 그림3과 같이 설정하였다. 초기에 주행 차량은 정지해 있으므로 주행차량들간의 초기 간격 거리는 각각 $L = 1$ m거리만큼 떨어져 있다. 이때 선두 차량은 그림3.(a)의 속도로 움직여 주면 그 뒤를 이어 후위 차량들이 각각의 선두 차량을 따라 가게 된다. 안전거리는 그림3.(a)의 속도가 변하므로 속도에 의존해서 $L + \rho v_i$ 만큼 변하게 된다. 선행차량의 속도가 빠르면 안전거리가 길어지고 선행차량의 속도가 느리면 안전거리가 짧아진다. 또한, 선행차량이 정지하면 최소거리 L 만큼의 거리를 유지한다. 이를 위해 제어입력 u_i 는 거리오차 y_{pi} 를 0으로 만들어서 주행차량들과의 실제 거리 $-\psi_i$ 와 안전거리 $L + \rho v_i$ 가 같아 지도록 정해진 매 시간마다 계산되어진다. 그림4는 외란이 존재하지 않을 때 주행차량의 속도와 가속도 궤적을 나타내며, 그림5는 주행차량의 차간 간격오차를 나타낸다. 차간 간격오차는 선두차량의 속도가 급격하게 바뀌는 지점에서만 약간의 오차를 보인다. 그림6은 외란[10]이 존재 할 때 주행차량의 속도와 가속도 궤적을 나타내며, 그림7은 주행차량의 차간 간격오차를 나타낸다. 차간 간격은 외란이 급격하게 감소되는 지점인 $t = 80$ 일 때 약간의 오차가 생기며, 시간이 지나면서 외란에 대한 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다. 그림4-7은 4대의 각기 다른 차량의 결과를 한 그림 상에 나타낸 것으로 각각의 차량들의 결과는 서로 비슷한 궤적을 갖는다. 그림8은 첫 번째 자동차의 불확실성 변수 $\theta_1 = \left[-\frac{d_{m1}}{m_1}, -\frac{A_{e1}}{m_1}, -\frac{2A_{e1}\rho}{m_1}, \frac{1}{m_1}, -\frac{\rho}{m_1 t_1} \right]^T$ 의 값을 추정한 그림이다. θ_1 의 모든 변수값들이 0에 가까운 값들이며, 추정값 역시 비슷한 값을 보여준다.

첫 번째 차량이 받는 외란 :

$$d_{11} = \begin{cases} 0 & t < 60 \\ 0.5[1 - e^{-0.2(t-60)}] & 60 \leq t < 80 \\ 0 & 80 \leq t \end{cases}$$

두 번째 차량이 받는 외란 :

$$d_{12} = \begin{cases} 0 & t < 60 \\ 0.6[1 - e^{-0.15(t-60)}] & 60 \leq t < 80 \\ 0 & 80 \leq t \end{cases}$$

세 번째 차량이 받는 외란 :

$$d_{13} = \begin{cases} 0 & t < 60 \\ 0.4[1 - e^{-0.25(t-60)}] & 60 \leq t < 80 \\ 0 & 80 \leq t \end{cases}$$

표 1. 차량별 파라미터
Table 1. Vehicle parameters

차량종류	공차중량 (curb mass)	차량길이(d)	drag 상수	엔진 시정수 (μ_1)
Daihatsu Charade CLS	916 Kg	1.9 m	$K_d = 0.44$ Kg/m	0.2 sec
Buick Reagal Custom	1464 Kg	2.2 m	$K_d = 0.49$ Kg/m	0.25 sec
BMW 750iL	1925 Kg	2.25 m	$K_d = 0.51$ Kg/m	0.2 sec

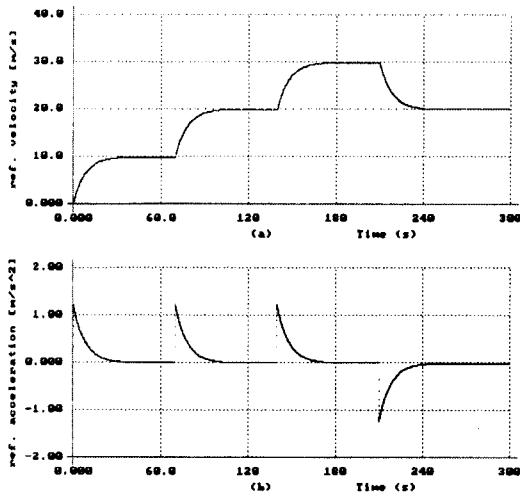


그림 3 선두차량의 (a)속도와 (b)가속도 궤적.
Fig. 3 (a)Velocity and (b)acceleration profiles of a leading car

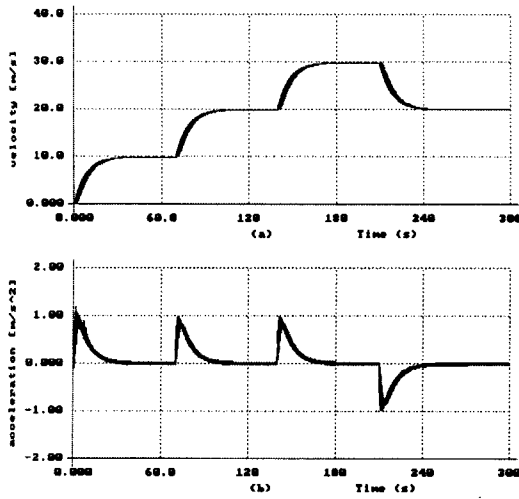


그림 4 외란이 존재하지 않을 때 주행차량의 (a)속도와 (b)가속도 궤적.
Fig. 4 (a)Velocity and (b)acceleration profiles of vehicle following without disturbances.

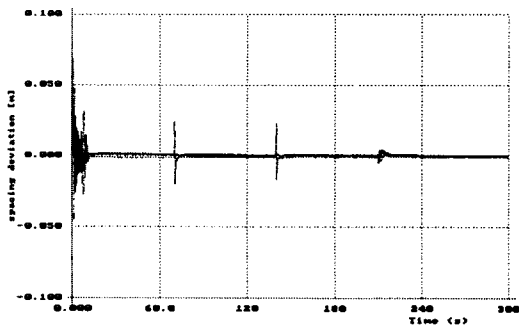


그림 5 외란이 존재하지 않을 때 주행차량의 간격오차
Fig. 5 Spacing deviation profiles of vehicle following without disturbances.

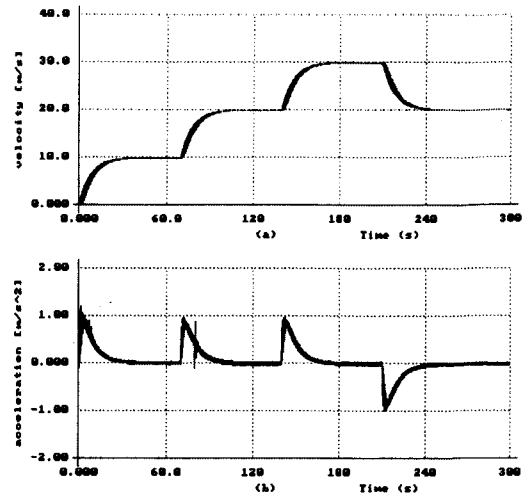


그림 6 외란이 존재할 때 주행차량의 (a)속도와 (b)가속도 궤적.
Fig. 6 (a)Velocity and (b)acceleration profiles of vehicle following with disturbances.

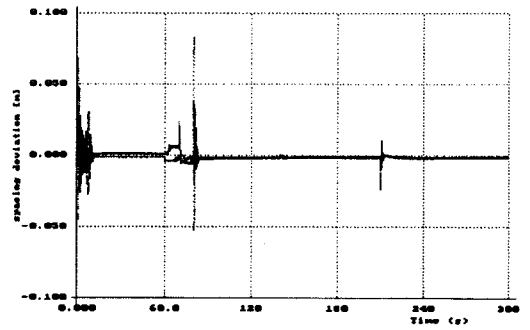


그림 7 외란이 존재할 때 주행차량의 간격오차
Fig. 7 Spacing deviation profiles of vehicle following with disturbances.

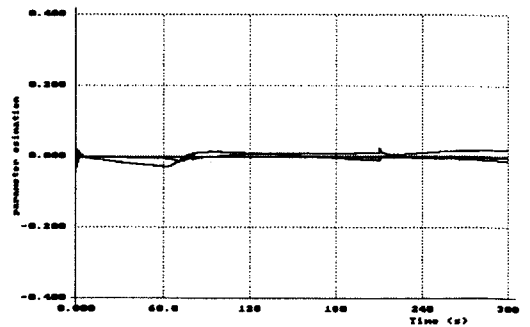


그림 8 외란이 존재할 때 첫 번째 추종차량의 파라미터의 추정 궤적
Fig. 8 Parameter estimation profiles of first following car with disturbances.

disturbances

5. 결 론

본 논문에서는 직진 주행 차량제어에 대한 강인적용제어 기법이 제시되었다. 선행차량의 속도에 알맞는 안전거리를 유지하게 함으로써 고정된 안전거리를 유지하는 방법보다 더 적절하며, 바람에 의한 외란, 트랜스미션 변화에 의한 외란 등 시간에 따라 변동하는 외란에 대처함으로써 기존의 방법보다 더 실용성이 있다 할 수 있다. 또한 가속도 관측기를 사용함으로써 각 자동차의 센서의 수도 줄일 수 있었다. 전체 시스템의 안정도가 보장되고 선행 차량에 대한 추종특성이 보장될 수 있음을 수학적으로 입증하였으며, 차간 거리, 속도 및 가속도가 원하는 값을 유지할 수 있음도 보였다. 컴퓨터 모의실험에서 파라미터 불확실성과 시변 외란이 존재하더라도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. T. Spooner and K. M. Passino, "Adaptive Control of a Class of Decentralized Nonlinear Systems," *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, vol. 41, no. 2, pp. 280-284, 1996.
- [2] S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "A System Level Study of the Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 114, pp. 286-292, June 1992.
- [3] T. Fujioka and K. Suzuki, "Control of Longitudinal and Lateral Platoon Using Sliding Control," *Vehicle System Dynamics*, vol. 23, pp. 647-664, 1994.
- [4] D. N. Godbole and J. Lygeros, "Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, vol. 1, pp. 398-402, 1994.
- [5] D. H. McMahon, V. K. Narendran, D. Swaroop, J. K. Hedrick, K. S. Chang, and P. E. Devlin, "Longitudinal Vehicle Controllers for IVHS: Theory and Experiment," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, pp. 1753-1757, 1992.
- [6] D. H. McMahon, J. K. Hedrick and S. E. Shladover, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, vol. 1, pp. 297-303, 1990.
- [7] P. Ioannou, Z. Xu, S. Eckert, D. Clemons and T. Sieja, "Intelligent Cruise Control : Theory and Experiment," *Proceedings of the 32nd IEEE Conf. on Decision and Control*, vol. 2, pp. 1885-1890, 1993.
- [8] S. B. Choi and J. K. Hedrick, "Vehicle Longitudinal Control Using an Adaptive Observer for Automated Highway Systems," *Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington*, pp. 3106-3110, June 1995.
- [9] C. C. Chen and P. Ioannou, "Automatic Vehicle Following," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1748-1752, 1992.
- [10] C. C. Chen, A. Stotsky and P. Ioannou, "Robust Platoon-stable Controller Design for Autonomous Intelligent Vehicles," *Proceedings of the 33rd IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 2431-2436, 1994.
- [11] Shahab Sheikholeslam, "Control of a class of interconnected nonlinear dynamical system : the platoon problem," *PH. D. Dissertation*, University of California, Berkeley, 1991.
- [12] P. Ioannou and C. C. Chen, "Autonomous Intelligent Cruise Control," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, pp. 657-672, 1993.
- [13] K. S. Narendra and A. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems, Prentice Hall Information and System Sciences Series*, 1989.

저 자 소 개

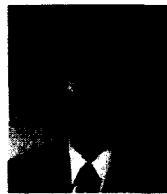


김 동 헌 (金 東 憲)

1970년 3월 8일 생. 1995년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 031-419-2313

E-mail : ddhkim@hymail.hanyang.ac.kr



양 해 원 (梁 海 元)

1950년 3월 20일 생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공학박). 1993년 미국 Yale대 방문교수. 1993년~현재 한양대학교 전자

컴퓨터 공학부 교수. 대한 전기학회 부회장

Tel : 031-400-5162

E-mail : hwyang@email.hanyang.ac.kr