

Backstepping 방법을 이용한 IVHS에서의 차량군 리드 차량의 종렬제어기 설계

박종호*, 정길도**

Longitudinal Control of the Lead Vehicle of a Platoon in IVHS using Backstepping Method

Jong Ho Park*, Kil To Chong**

ABSTRACT

In this paper, a longitudinal control of the lead vehicle for a platoon in IVHS Regulation Layer is proposed. The backstepping method has been used for the controller design. This method has an advantage in that its stability need not be proven since the controller is designed based on the Lyapunov Function. The control object is that the lead vehicle tracks a reference velocity and maintains a safe distance between the inter-platoons while the followers are keeping the speed of the lead vehicle of a platoon. The coordinate of system is transformed to a new coordinate system for its convenience to design controller. The new coordinate system is composed of error and new error variable. The error is the difference between the safe distance and the actual distance of inter-platoons. A new error variable is the difference between the velocity of vehicle and the estimated state of a system operated by the virtual input. The Lyapunov function is obtained based on the variables of new coordinate system.

In the computer simulation, several cases have been studied such as when the lead vehicle is tracking the optimal speed, or a lead vehicle of the following platoon tracks the velocity of the previous platoon while maintaining a safe distance. Also a nonlinear engine time constant case has been investigated. All the simulation results show that the designed controller satisfies the control object sufficiently.

Key Words : IVHS(지능형 교통 제어 시스템), Platoon(차량군), Lyapunov function(리아프노프 함수), Backstepping Controller (백스텝핑 제어기)

1. 서론

현대 사회에서 사람들은 자동차 기술의 발달로 인하여 많은 편의를 제공받고 있다. 하지만 교통 사고의 증가, 소음 및 대기 오염의 악화, 고속 도로

의 교통 체증 등 많은 문제들이 발생하고 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여 여러 선진국에서는 차세대 고안전 차량(Smart-Car)의 개발을 위한 연구와 더불어 IVHS(Intelligent Vehicle Highway System) 분야에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[1][2][3]}.

* 전북대학교 전자공학과 제어 전공

** 전북대학교 전자정보공학부 메카트로닉스 연구센터

IVHS는 고속도로상에서의 교통 정체 문제 해결을 위해 미국, 유럽, 일본 등 여러 선진 국가에서 연구되고 있는 지능화 된 고속도로 운행 시스템이다. IVHS에서 차량의 제어는 차량군(Platoon)을 이용하는 형태가 주로 이용되고 있으며 이러한 차량군 제어의 목적은 한정된 도로에서 최대의 차량을 통과시키며 안전하고 빠르게 운전자가 원하는 목적지에 도달하도록 하는 것에 있다^{[4][5]}. 여기서 차량군이란 여러 대의 차량을 하나의 개체로 취급하는 것을 말한다.

차량이나 차량군의 제어 방식은 크게 차량의 조향을 제어하는 횡렬제어(Lateral Control)와 차량 주행 방향을 제어하는 종렬 제어(Longitudinal Control)로 나눌 수 있다. 기존에 연구되어진 차량의 횡렬 제어방법으로는 궤환 선형화 방법의 하나인 주파수를 이용한 FLSQ(Frequency-shaped linear quadratic) 방법 등 다양한 연구가 보고되었다^{[6][7]}. 또한 차량의 종렬 제어는 Godbole^[8]과 연구원들이 출력 궤환 선형화 방법을 이용하여 플래툰 선두 차량의 종렬 제어를 설계한 연구 결과를 발표하였고, Hedrick과 McMahon^[9]는 슬라이딩 모드를 이용한 종렬 제어를 제시하였다. 또한 Shladover^{[10][11]}는 PID 제어 방식을 사용한 제어를 설계하였다.

IVHS에서의 차량 제어는 제어대상에 따라 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 차량들의 운동을 원활하게 하는 파워트레인(Powertrain) 제어^{[12][13]}와, 둘째로 차량군의 내부 차량을 제어하는 팔로우(Follower) 모드 제어를 들 수 있으며, 제어 방법으로는 Sheikholeslam과 Warnick등에 의해 출력 궤환 선형화 방법을 이용한 결과가 발표되었다^{[14][15]}. 셋째는 리더(Leader)모드 제어로 차량군과 차량군 사이의 선도 차량을 제어하는 것으로 Godbole 등에 의해 연구가 진행된 바 있다^{[16][17]}.

일반적으로 제어기 설계는 시스템의 제어 목적에 적합한 제어기를 설계하며, 설계한 제어기를 장착한 폐회로 시스템의 안정성을 입증하는 두 가지 단계로 이루어진다. 그러나 백스텝핑(Backstepping) 제어 방법은 비선형 시스템의 안정성 판별 문제를 해결하고, 제어성능 향상의 두 가지 목적을 동시에 만족시키는 제어기 설계 방법이다^[18]. 또한, 백스텝핑 제어기법은 리아프노프 함수(Lyapunov Function)를 사용하여 시스템의 안정성 문제를 해결하며, 자동차의 현가 장치, 로봇 팔의 위치 제어, 그리고 모터 제어 등 여러 분야에 이용된다^{[19][20][21][22][23]}. 특히

자동차처럼 안정성이 강조되는 시스템에 적합한 제어 방법이다. 이런 백스텝핑 제어기법은 비선형 시스템의 유용한 비선형 항을 제어기 설계에 이용함으로써 제어기 성능을 향상시키는 장점을 가지며, 출력 궤환 선형화 방법을 포함하는 제어기 설계 방법으로 제어기 형태가 서로 유사할 수도 있다.

Fig.1은 백스텝핑 제어기 설계 방법을 블록선도로 나타낸 것이다. 백스텝핑 방법을 이용하여 제어기를 설계할 때 먼저 시스템을 제어하기 쉬운 좌표 시스템으로 변환해야 한다. 이때 시스템의 가상 제어 변수(Virtual Control Variable)와 에러 변수(Error Variable) 등을 이용하여 시스템을 변환하고, 이후 새 좌표로 변환된 시스템의 리아프노프 함수(Lyapunov function)를 이용하여 제어 목적에 맞는 제어기를 설계한다. 또한 필요한 경우 시스템의 유용한 비선형 부분을 제어기 설계에 사용한다.

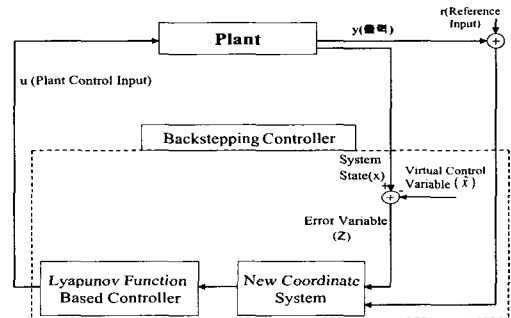


Fig. 1 The block diagram of backstepping control design method

백스텝핑 제어 기법을 제어기 설계에 이용한 연구를 살펴보면, Jung-Shan Lin^[19]은 스프링과 댐퍼를 이용하는 기존의 자동차 현가 장치에 유압 액추에이터를 추가한 능동형 현가 장치를 제어하는데 백스텝핑 제어 기법을 이용하였으며, 이 때 차량 모델은 4분의 1차량(Quarter-car)모델을 사용하였다. 또한 A.A. Abouelsoud^[20]은 로봇의 유연한 조인트(Flexible-Joint)에 대하여 외란에 강한 백스텝핑 제어를 설계하였으며, Ahong-Ping Jiang^[21]은 이동 로봇의 추적 문제를 해결하기 위해 이용하였다. 그리고 Duco W.J. Pulle^[22]은 모터의 토크 제어를 위한 적응 백스텝핑 제어기를 설계하였으며, Hemant Melkote^[23]은 브러시리스(Brushless) 모터의 제어와 로봇 매니퓰레이터(Manipulator) 제어에 적응 백스텝핑 제어 기법을 사용한바 있다.

본 논문에서는 고속도로 상에서의 교통 문제를 해결을 위해 차량군과 차량군 사이의 선도 차량을 제어하는 리더 모드 제어에 관한 연구를 수행하였다. 특히 차량 주행 제어를 위한 종렬 제어를 설계하였다. 차량 주행 모델은 비선형 특성이 강하고 안정성이 강조되는 시스템이므로 제어기는 시스템의 안정성을 보장하며 제어 성능을 향상시키는 백스텝핑(Backstepping) 제어 기법을 사용하여 설계하였다. 또한, 차량 주행 모델 시스템의 유용한 비선형 항을 제어기 설계에 이용하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 차량군과 차량 모델링에 대하여 살펴보았으며, 3장에서는 본 연구에서 설계한 백스텝핑 차량 종렬 제어기에 대하여 설명하였다. 그리고 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 설계한 제어기를 시스템에 적용하여 그 결과를 분석하였으며, 마지막으로 5장에서 본 연구를 결론 지었다.

2. 차량군과 차량 모델링

2.1 차량군

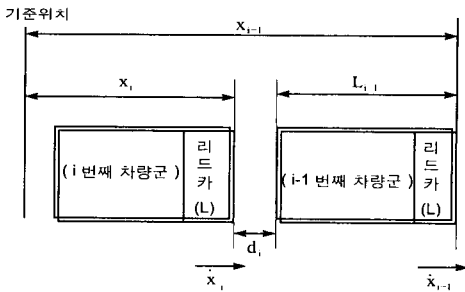


Fig. 2 Simplified model of platoon

Fig. 2은 간략화 된 두 개의 차량군을 도식화한 그림이다. 차량군에서 L로 표시된 것은 차량군의 선도 차량을 의미하고 x_{i-1} , x_i 는 기준 점에서 각 차량군까지 거리를 의미한다. 또한 \dot{x}_i , \dot{x}_{i-1} 는 차량군의 현재 속도를, 화살표 방향은 차량군의 진행 방향을 나타낸다. 차량군을 운행할 때 돌발 상황에서의 충돌을 피하기 위한 두 차량군 사이의 안전거리가 필요하며, 안전 거리는 다음 식 (2.1)과 같이

정의한다.

$$D_i = \lambda_a \ddot{x}_i + \lambda_v \dot{x}_i + \lambda_p \quad (2.1)$$

여기서, \dot{x}_i 는 i번째 차량군의 속도를, \ddot{x}_i 는 i번째 차량군의 가속도를 나타낸다. 또한 식 (2.1)의 각 계수 값들은 Godbole^[16]이 선택한 값과 동일하게 $\lambda_a = 0$, $\lambda_v = 1$ 그리고 $\lambda_p = 10$ 으로 선정하였다. 즉, 안전거리는 가속도항에 영향을 받지 않으며, 속도항에 비례한다. 그리고 속도가 0인 경우 즉, 정지 상태에서 기본적으로 두 차량군의 안전을 위하여 유지해야할 거리는 λ_p 로 정의된다.

주어진 식 (2.1)이 차량군 사이의 안전거리를 나타내며, 차량군 사이의 실제 떨어진 거리는 식 (2.2)과 같다.

$$d_i = x_{i-1} - x_i - L_{i-1} \quad (2.2)$$

단, x_{i-1} 과 x_i 는 임의의 기준 위치에서 각 차량군까지의 거리를 나타내고, L_{i-1} 은 i-1번째 차량군의 길이를 나타낸다. 본 논문에서는 L_{i-1} 를 20m로 가정하였다. 차량군 사이의 안전거리와 차량군 사이의 실제 거리는 같아야 한다. 따라서 두 거리의 차이를 에러(e_i)로 정의하고, 식 (2.3)과 같이 표현하였다. 차량군 종렬 제어의 목적은 원하는 속도를 유지하면서 에러가 0이 되도록 하는 것이다.

$$e_i = x_{i-1} - x_i - 20 - (\dot{x}_i + 10) \quad (2.3)$$

2.2 차량 모델링

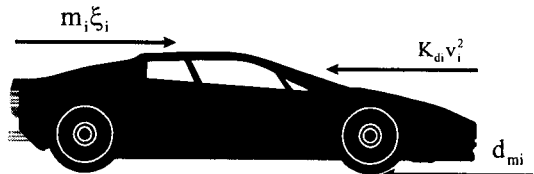


Fig. 3 The forces of a traveling vehicle

차량 주행 모델링을 위하여 주행 중 차량에 작용하는 힘을 포함하는 Fig. 3과 같은 차량에 대하여 살펴보기로 하자. 차량 주행 모델의 동역학적 방정식은 뉴턴의 제 2법칙이나 에너지 방법으로 구할 수 있다. 식 (2.4)은 뉴턴의 제2법칙에 근거하여 구한 식이다.^{[8][11][14][15]} 단, i는 i번째 차량군의 선도 차량을 의미한다.

$$m_i \dot{v}_i = m_i \xi_i - K_{di} v_i^2 - d_{mi}, \quad (2.4)$$

$m_i \xi_i$: i번째 차량에 작용하는 엔진 파워,

ξ_i : i번째 차량 엔진의 추진 가속도

m_i : 차량 무게(약 1600kg),

d_{mi} ($= \mu_r m_i$) : 기계 마찰 저항력

μ_r : 구름 저항 계수 (약 0.01)

$K_{di} v_i^2$: 주행중의 공기 저항으로 인하여 발생하는 힘,

K_{di} : $\rho A_i C_{di}/2$,

ρ : 공기 밀도($= 0.12290 \text{ kg} \cdot \text{f s}^2/\text{m}^4$),

C_{di} : 차량 항력계수(drag coefficient=0.195),

A_i : 차량의 정면 투영 면적(약 5.2m^2)

차량의 엔진 동력학적 특성은 간단히 식 (2.5)과 같이 나타낼 수 있다. 즉

$$\dot{\xi}_i = -\frac{\xi_i}{\tau_i(v_i)} + \frac{u_i}{m_i \tau_i(v_i)}, \quad (2.5)$$

$\tau_i(v_i)$: i번째 차량의 엔진 시상수,

u_i : 엔진 스톱틀 밸브 입력.

식 (2.4)을 한 번 미분하게 되면 엔진의 특성을 나타내는 ξ_i 값을 이용할 수 있는 식 (2.6)을 얻게 된다.

$$m_i \ddot{v}_i = m_i \dot{\xi}_i - 2K_{di} v_i \dot{v}_i \quad (2.6)$$

엔진 특성식 (2.5)을 이용하여 식 (2.6)을 정리하고자 할 때 ξ_i 값이 다시 사용되므로 ξ_i 를 식(2.4)에서 아래의 식 (2.7)과 같이 유도하여 사용한다.

$$\xi_i = \frac{1}{m_i} \{ m_i \dot{v}_i + K_{di} v_i^2 + d_{mi} \} \quad (2.7)$$

식 (2.6), 식(2.5)과 식(2.7)을 이용하여 아래의 식 (2.8)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{v}_i &= -2K_{di} v_i \dot{v}_i + \frac{u_i}{\tau_i(v_i)} \\ &\quad - \frac{1}{\tau_i(v_i)} [\dot{v}_i m_i + K_{di} v_i^2 + d_{mi}] \\ m_i \ddot{v}_i &= \left\{ -2K_{di} v_i \dot{v}_i - \frac{1}{\tau_i(v_i)} [\dot{v}_i m_i + K_{di} v_i^2 + d_{mi}] \right\} \\ &\quad + \frac{1}{\tau_i(v_i)} u_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

이때, $v_i = \dot{x}$ 로 놓으면, 식 (2.8)을 아래 식 (2.9)와 같이 상태 방정식으로 표현할 수 있다.

$$x_1 = x_i$$

$$x_2 = \dot{x}_i = \dot{x}_1$$

$$x_3 = \ddot{x}_i = \dot{x}_2$$

$$\dot{x}_3 = \ddot{\ddot{x}}_i = b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) + a_i(\dot{x}_i)u_i \quad (2.9)$$

$$= b_i(x_2, x_3) + a_i(x_2)u_i$$

$$\text{단, } a_i(\dot{x}_i) = a_i(x_2) = \frac{1}{m_i \tau_i(\dot{x}_i)} = \frac{1}{m_i \tau_i(x_2)}$$

$$\begin{aligned} b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) &= -\frac{2K_{di}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i \\ &\quad - \frac{1}{\tau_i(\dot{x}_i)} \left[\ddot{x}_i + \frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_i(x_2, x_3) &= -\frac{2K_{di}}{m_i} x_2 x_3 \\ &\quad - \frac{1}{\tau_i(x_2)} \left[x_3 + \frac{K_{di}}{m_i} x_2^2 + \frac{d_{mi}}{m_i} \right] \end{aligned}$$

본 논문에서는 모든 상태 변수 x_1, x_2, x_3 는 관측기 없이 정확한 측정이 가능하다고 가정하였다. 그리고 시스템의 각 변수들, 즉, 차량 무게, 공기 밀도, 차량 투영 면적, 공기 저항 계수 등의 시스템 매개 변수 값들은 정확하다고 가정하였다. 그리고 엔진 시상수는 속도에 대한 함수이지만 문제를 간략화하기 위하여 상수로 가정하여 이용하는데 본 논문에서도 Shladover^[11]와 송재복^[24]의 논문에서 주어진 상수 값(0.1)을 사용하였다. 그러나 $\tau_i(v_i)$ 를 속도에 대한 함수로 가정하여 시뮬레이션을 실시하였으며 4장에서 그 결과를 비교하여 보았다.

3. Backstepping 제어기 설계

본 연구에서는 차량군을 원하는 속도로 유지하면서 속도에 적합한 차량군과 차량군 사이의 안전 거리를 확보하는 백스텝핑 제어기를 설계하였다. 전체 폐회로 시스템의 안정성을 보장함과 동시에 제어 목적에 부합하는 제어기를 설계하기 위하여 2장 2절에서 주어진 에러와 차량 주행 모델식을 바탕으로 시스템의 리아프노프 함수를 구한 뒤 제어기 설계에 이용하였다.

먼저, 차량 주행 모델식 (2.9)을 식 (3.1)과 같이 변형한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= b_i(x_2, x_3) + a_i(x_2)u_i \\ \dot{x}_3 &= b_i'(x_2, x_3) - \frac{1}{\tau_i(x_2)}x_3 + a_i(x_2)u_i \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{단, } a_i(x_2) = \frac{1}{m_i \tau_i(x_2)}$$

$$\begin{aligned} b_i'(x_2, x_3) &= -\frac{2K_{di}}{m_i}x_2x_3 \\ &\quad - \frac{1}{\tau_i(x_2)} \left[\frac{K_{di}}{m_i}x_2^2 + \frac{d_{mi}}{m_i} \right] \end{aligned}$$

다음으로 에러에 대한 미분식을 식 (3.2)과 같이 나타낸다.

$$\dot{e}_i = \dot{x}_{i-1} - x_2 - x_3 \quad (3.2)$$

에러에 관한 리아프노프 함수는 식 (3.3)과 같이 표현 할 수 있으며, 주어진 리아프노프 함수의 미분식은 식 (3.4)로 표현된다. 그리고 $\dot{V} < 0$ 즉, 음의 값(Negative definite)가져야 한다. 따라서 $\mathcal{W}(e_i)$ 는 양의 값(Positive definite)을 갖는다.

$$V = \frac{1}{2} e_i^2 \quad (3.3)$$

$$\dot{V} = e_i \cdot \dot{e}_i = e_i(\dot{x}_{i-1} - x_2 - x_3) < -\mathcal{W}(e_i) \quad (3.4)$$

여기서 $\dot{V} < -\mathcal{W}(e_i)$ 라는 관계식을 만족하도록 변수 x_3 대신 \hat{x}_3 라는 가상제어변수를 선정하여 식 (3.5)를 구성하고, \hat{x}_3 값을 식 (3.6)과 같이 놓는다.

$$\dot{V} = e_i(\dot{x}_{i-1} - x_2 - \hat{x}_3) < -\mathcal{W}(e_i) \quad (3.5)$$

$$\hat{x}_3 = c_1 e_i + \dot{x}_{i-1} - x_2, \quad c_1 > 0 \quad (3.6)$$

그리고 x_3 와 \hat{x}_3 의 차를 식 (3.7)과 같이 새로운 에러상태변수 z 로 설정한다.

$$z = x_3 - \hat{x}_3 \quad (3.7)$$

에러상태변수 z 를 미분하여 정리하면 시스템의 입력 u_i 가 포함된 식 (3.8)을 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{x}_3 - \dot{\hat{x}}_3 = \dot{x}_3 - (c_1 \dot{e}_i + \ddot{x}_{i-1} - \dot{x}_3) \\ &= b_i' - \frac{1}{\tau} x_3 - c_1 \dot{e}_i - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + a_i u_i \end{aligned} \quad (3.8)$$

앞에서 주어진 에러 미분식 (3.2)와 에러 상태 변수 z 의 미분식 (3.8)에 가상제어변수 \hat{x}_3 의 값을 대입하여 정리하면 식 (3.9), (3.10)과 같이 새로운 좌표 시스템으로 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_i = -c_1 e_i - z \quad (3.9)$$

$$\dot{z} = \left\{ b_i' - \frac{1}{\tau} x_3 - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + c_1^2 e_i + c_1 z \right\} + a_i u_i \quad (3.10)$$

식 (3.9), (3.10)으로 표현된 전체 시스템에 대한 리아프노프 함수를 식 (3.11)과 같이 가정한다.

$$V_t = \frac{1}{2} e_i^2 + \frac{1}{2} z^2 \quad (3.11)$$

주어진 전체 시스템의 리아프노프 함수의 미분식은 (3.12)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= e_i \dot{e}_i + z \dot{z} \\ &= e_i(-c_1 e_i - z) + z \left\{ b_i' - \frac{1}{\tau} x_3 - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + c_1^2 e_i + c_1 z \right\} + a_i u_i \\ &= -c_1 e_i^2 + z \left(b_i' - \frac{1}{\tau} x_3 - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + c_1^2 e_i - e_i + c_1 z + a_i u_i \right) \\ &= -c_1 e_i^2 + z \left(b_i' - \frac{1}{\tau} (x_3 - \hat{x}_3) - \frac{1}{\tau} \hat{x}_3 - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + c_1^2 e_i - e_i + c_1 z + a_i u_i \right) \\ &= \left\{ -c_1 e_i^2 + \left(-\frac{1}{\tau} + c_1 \right) z \right\} + \left\{ z \left(b_i' - \frac{1}{\tau} \hat{x}_3 - \ddot{x}_{i-1} + x_3 + c_1^2 e_i - e_i + a_i u_i \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

주어진 리아프노프 함수의 미분식이 음의 값을 가져야 한다는 조건에 맞추어 시스템의 입력 u_i 를 식 (3.13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{1}{a_i} \left\{ -c_2 z - b_i' + \frac{1}{\tau} \hat{x}_3 + \ddot{x}_{i-1} - x_3 - c_1^2 e_i + e_i \right\} \\ &= \frac{1}{a_i} \left\{ -c_2 z - b_i' + \frac{1}{\tau} (c_1 e_i + \dot{x}_{i-1} - x_2) + \ddot{x}_{i-1} - x_3 - c_1^2 e_i + e_i \right\} \end{aligned} \quad (3.13)$$

따라서 식 (3.13)을 식 (3.12)에 대입하면 식 (3.14)와 같은 \dot{V}_t 의 최종값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= e_i \dot{e}_i + z \dot{z} \\ &= -c_1 e_i^2 + \left(-\frac{1}{\tau(x_2)} + c_1 - c_2 \right) z^2 < 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\text{따라서 } c_1 > 0, \quad c_1 < \frac{1}{\tau(x_2)} + c_2$$

그리고 시스템 입력 u_i 를 원 시스템 식(2.9)에 대입한 전체 폐회로 시스템은 식 (3.15)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= b_i'(x_2, x_3) - \frac{1}{\tau_i(x_2)} x_3 + a_i(x_2)u_i \\ u_i &= \frac{1}{a_i} \left\{ -c_2(x_3 - c_1 e_i - \dot{x}_{i-1} + x_2) - b_i' \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\tau} (c_1 e_i + \dot{x}_{i-1} - x_2) + \ddot{x}_{i-1} - x_3 - c_1^2 e_i + e_i \right\} \\ &= \frac{1}{a_i} \left\{ -b_i' + \dot{x}_{i-1} - (c_2 + 1)x_3 \right. \\ &\quad \left. + (c_2 + \frac{1}{\tau})(\dot{x}_{i-1} - x_2) + (c_2 c_1 + \frac{1}{\tau} c_1 - c_1^2 + 1)e_i \right\} \\ \dot{x}_3 &= \ddot{x}_{i-1} - \left(\frac{1}{\tau_i(x_2)} + c_2 + 1 \right) x_3 \\ &\quad + \left(\frac{1}{\tau_i(x_2)} + c_2 \right) (\dot{x}_{i-1} - x_2) \\ &\quad + \left(\frac{1}{\tau_i(x_2)} c_1 + c_2 c_1 - c_1^2 + 1 \right) e_i \end{aligned} \quad (3.15)$$

실제 차량에서 기계적으로 이용할 수 있는 가속도의 범위, 사람들이 요구하는 편안한 승차감을 위한 저크(jerk)의 변화량, 원하는 속도의 유지와 도달 시간 그리고 차량군 간의 안전 거리 유지 등 모든 것들을 종합하여 제어기의 계수들의 값을 선정한다. 특히, 시스템의 파라메타인 자동차의 엔진 시상수 $\tau_i(v_i)$ 를 제어기 설계에 이용하였다. 일반적으로 엔진 시상수는 속도에 대한 함수이지만 문제를 간략화 하기 위하여 상수로 가정하여 이용하는데 본 논문에서도 Shladover^[11]와 송재복^[24]의 논문에서 주어진 0.1이라는 상수 값을 사용하여 시뮬레이션을 전개하였다. 그러나 $\tau_i(v_i)$ 를 속도에 대한 함수로 가정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과를 비교하여 보았다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

백스텝핑 제어 기법으로 설계된 제어기가 차량군 선도 차량이 원하는 속도를 유지하며, 차량군 간의 안전 거리를 확보하는지에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석해 보았다. 컴퓨터 시뮬레이션의 단위 시간(step time)을 0.02초로 선정하였다. 그리고 저크(jerk)는 가속도의 미분항으로 차량의 승차감의 척도로 쓰인다. 그림에서 속도의 단위는 m/s를 거리의 단위는 m이며, 속도, 가속도, 저크의 그래프는 i번째 차량군의 응답과, i+1번째 차량군의 응답을 나타내었으며, 차간거리 그래프에서는 스페이싱(Spacing) 1은 i번째 차량군과 i-1번째 차량

군 사이의 거리를 나타내며, 스페이싱 2는 i번째 차량군과 i+1번째 차량군 사이의 거리를 나타낸다.

시뮬레이션을 다음과 같은 시나리오로 실시하였다. 먼저 i-1번째 차량군의 기준 속도가 20m/s에서 25m/s로 변화되며, i번째 차량군의 초기 조건의 경우 실제거리가 안전거리보다 약 5m정도 짧고 앞 차량군의 초기 속도는 18m/s로 가정하였으며, i+1번째 차량군의 초기속도는 20m/s로 가정하였다. 즉, 앞 차량군의 초기 속도가 다음 차량군의 초기 속도보다 적은 경우에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 4의 시뮬레이션 결과에 나타나듯이 속도 출력의 경우 약 7초 후에 i번째 차량군과 i+1번째 차량군이 원하는 속도와 안전 거리를 일정하게 유지하는 것을 알 수 있다. 또한, 저크(jerk) 출력도 변화가 초기에만 존재하며, 빠른 시간 안에 안정되어 승차감에 큰 무리가 없을 것이며, 또한 전체적인 응답 결과도 좋음을 알 수 있었다.

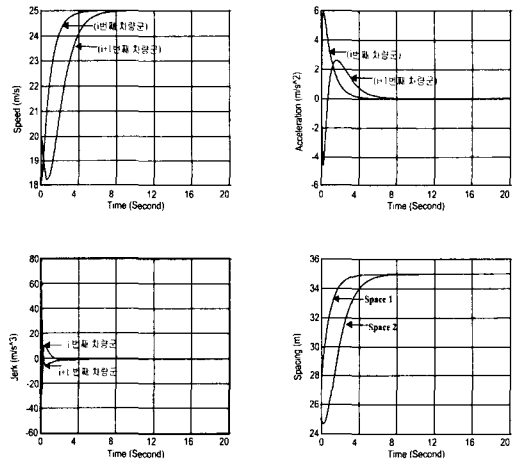


Fig. 4 Backstepping controller (Initial velocity : 18 m/s, Initial error : -5m)

다음으로 i-1번째 차량군의 기준 속도가 20m/s에서 15m/s로 그리고 15m/s에서 다시 25m/s로 변화될 때 i번째 차량군 초기 조건은 실제 거리와 안전 거리의 차이는 없고 i번째 차량군과 i+1번째 차량군의 초기 속도는 20m/s로 동일한 경우를 살펴보았다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나듯이 속도를 15m/s 유지하고 안전 거리를 확보하는데 약 7초의 시간이, 속도를 25m/s 유지하고 안전거리를 확보하는데 약 17초가 소요되었다. 또한 전체적인 응답 결과도 좋음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서 설계된 제어기는 고속도로의 통행량을 증가시키기 위한 목적으로 IVHS의 레귤레이션 영역에서의 차량군의 선도 차량을 종렬 제어하기 위한 것이며 백스텝핑(Backstepping) 제어 기법을 이용하여 설계하였다. 차량 모델은 Hedrick의 차량 주행 모델식을 이용하였으며, 시스템의 각 파라미터(Parameter) 값들은 정확하다는 가정 하에 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

자동차와 같이 안정성이 강조되는 시스템에는 백스텝핑 제어 방법과 같이 시스템의 안정성을 보장하는 제어 기법이 필요하다고 본다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 안정성을 바탕으로 제어기를 설계하는 백스텝핑 제어 기법을 가지고서 주어진 Hedrick의 차량 주행 모델을 기초로 제어기를 설계하였으며, 제어기의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 또한 자동차의 엔진 시상수 $\tau_i(v_i)$ 를 제어기에 이용하였다.

시뮬레이션을 통하여 설계된 백스텝핑 제어기가 차량군의 종렬 제어에 적절함을 알 수 있었다. 먼저 선도 차량에 요구되는 속도, 또는 앞 차량군의 선도 차량 속도를 추적하는데 있어서 초기 조건과 관계없이 빠른 시간 내에 원하는 속도로 수렴하였으며, 속도에 따른 안전거리 역시 빠른 시간 안에 유지함을 알 수 있었다. 또한 가속도와 저크(Jerk)의 출력들도 좋은 결과를 나타내었다. 초기 조건의 값을 변화시킨 경우나 가속도와 저크의 값을 일정한 범위로 제한한 경우에도 빠른 시간 안에 원하는 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 또한 차량의 특징을 나타내는 엔진 시상수 $\tau_i(x_2)$ 의 변화에도 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 지역 협력 연구센터 지원 연구비로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Varaiya, "Smart cars on smart roads: Problems of control," IEEE Trans. Automated Control Vol.

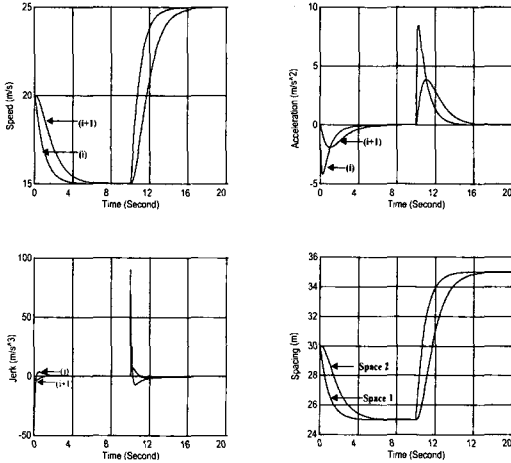


Fig. 5 Backstepping controller(velocity: 20→15→25m/s, $\tau : 0.1$)

여기서, Fig. 5는 $\tau_i(v_i)$ 를 0.1로 고정한 경우이고, Fig. 6은 $\tau_i(v_i)$ 를 $0.1/(1+e^{-v_i})$ 의 비선형 함수로 놓았을 경우이며, 두 경우 모두 유사한 결과를 보였다. 따라서 백스텝핑 제어기는 차량의 특징을 나타내는 $\tau_i(v_i)$ 를 제어기에 이용하면서도 그 영향을 최소화함을 알 수 있었다. 여기서 $\tau_i(v_i)$ 를 $0.1/(1+e^{-v_i})$ 로 선정한 이유는 주어진 식이 실제 차량의 시상수(time constant)와 유사한 특성을 나타내기 때문이다.

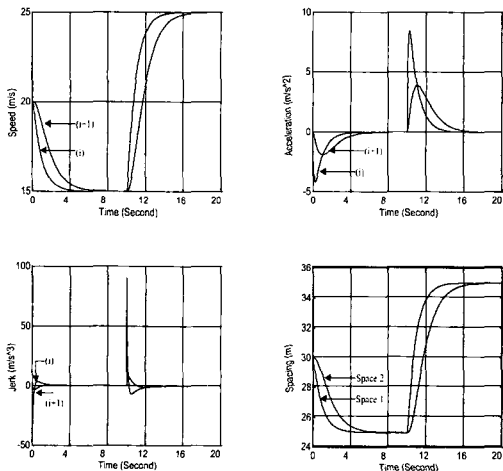


Fig. 6 Backstepping controller($\tau : 0.1/(1+\exp(-v))$)

- 38, No. 2, pp. 195-207, 1993.
2. Robert E. Fenton, "IVHS/AHS : Driving into the Future," IEEE Control Systems, pp. 13-20, 1994.
 3. J.K.Hedrick, M. Tomizuka, and P.Varaiya, "Control Issues in Automated Highway Systems," IEEE Control Systems, pp. 21-32, 1994.
 4. F. Eskafi, "Modeling and Simulation fo the Automated Highway System," Requirements for the degree, Univ. of California, Berkeley, 1996.
 5. John Lygeros and Datta N. Godbole, "An Interface Between Continuous & Discrete-Event Controllers for Vehicle Automation," ACC, pp. 801-805, Jun, 1994.
 6. Heui Peng and Masayoshi Tomizuka, "Vehicle Lateral Control for Highway Automation," ACC, pp. 788-794, 1990.
 7. Wonshik Chee and Masayoshi Tomizuka, "Steering and Braking Control of Tractor- Semitrailer Vehicle in Automated Highway System," ACC, pp. 788-794, Jun, 1995.
 8. D. Godbole and J. Lygeros, "Longitudinal control of the lead car of a platoon," American Control Conf., pp. 398-402, Jun, 1994.
 9. J. K. Hedrick & D.McMahon and V.Narendran and D.Swaroop, "Longitudinal Vehicle Controller Design for IVHS Systems", in American Control Conf., pp. 3107-3112, 1992.
 10. S.E. Shladover, "Vehicle follower Control for Dynamic Entrainment of Automated Guideway Transit Vehicles," Trnactions of the ASME, Vol. 101, pp. 314-320, Dec. 1979.
 11. S.E. Shladover, "Longitudinal Control of Automated Guideway Transit Vehicles within Platoons," Trnactions of the ASME, Vol. 100, pp. 302-310, Dec. 1978.
 12. D. H. McMahon, J. K. Hedrick, S. E. Shladover, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems," in American Control Conf., pp. 297-303, 1990.
 13. D. Cho, J. K. Hedrick, "Automotive Powertrain Modeling for Control," Transactions of the ASME, vol. 111, pp. 568-576, 1989.
 14. S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles with no Communication of Lead Vehicle Information," American Control Conf., pp. 3102-3106.
 15. S. Warnick and A. Rodriguez, "Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles with Multiple Saturating Nonlinearities," in American Control Conf., pp. 403-407.
 16. D. Godbole and J. Lygeros, "Longitudinal control lead car of a platoon," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, No. 4, pp. 1125-1135, 1994.
 17. S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles," American Control Conf., pp. 291-297, 1990.
 18. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design," John Wiley & Sons, Inc, 1995.
 19. Jung-Shan Lin and Ioannis Kanellakopoulos, "Nonlinear Design of Active Suspensions," IEEE Control Systems, pp. 45-59. June 1997.
 20. A.A. Abouelsoud, "Robust Regulator for Flexible-Joint Robots Using Integrator Backstepping," Journal of Intelligent and Robotics Systems 22 : pp.23-38, 1998.
 21. Zhong-Ping Jiang and Henk Nijmeijer, "Tracking Control of Mobile Robots : A Case Study in Backstepping," Automatica, Vol. 33, No. 7, pp. 1393-1399, 1997.
 22. Duco W.J. Pulle and Ian R. Petersen, "A Backstepping Approach to Continuous Time Direct Torque Control," Australian Defence Force Academy, Australia. 1997.
 23. Hemant Melkote & Farshad Khorrami, "Robust Adaptive Control of Direct Drive Brushless DC Motors and Applications to Robotic Manipulators," IEEE International Conference on Control Applications Hartford, pp. 288-293, October, 1997.
 24. 송재복, 이승만, "시간 지연 제어를 이용한 엔진 토크 및 엔진/자동 변속기 속도 제어 시스템," Control, Automation and System Engineering. Vol. 2, No. 2, pp. 81-87, June, 1996.