

# 적응 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용한 직진 주행 차량 제어

論 文

52D-1-1

## Longitudinal Motion Control of Vehicles Using Adaptive Sliding Mode Cascade Observer

金應錫\* · 金澈珍\*\* · 李炯燦\*\*\*

(Eung-Seok Kim · Cheol-Jin Kim · Hyung-Chan Rhee)

**Abstract** - In this paper, an observer-based adaptive controller is proposed to control the longitudinal motion of vehicles. The standard gradient method is used to estimate the vehicle parameters, mass, time constant, etc. The inter-vehicle spacing and its derivatives are estimated by using the sliding mode cascade observer introduced in this paper. It is shown that the proposed adaptive controller is uniformly ultimately bounded. It is also shown that the errors of the relative distance, the relative velocity and the relative acceleration asymptotically converge to zero. The simulation results are presented to investigate the effectiveness of the proposed method.

**Key Words** : 축차 관측기, 직진주행제어, 적응칙

### 1. 서 론

차량의 직진 주행 제어는 AVHS에서 중요한 부분을 차지한다. 이는 적응 순항제어, 충돌방지제어 등에 적용하는 기반 기술이기 때문이다. 주행 차량의 직진운동 제어기술을 구현하기 위한 핵심 기술은 센서 융합, 상황판단 및 시스템 제어 등이다. 본 논문에서는 차량의 직진 주행제어를 구현하기 위한 여러 가지 문제 가운데 시스템 제어기 설계에 주안점을 둔다. 이 문제를 해결하기 위해 다양한 제어기들[1]~[12]이 적용되어 왔다. [1]에서는 분산형 비선형 시스템에 대한 적응제어기법이 차량의 직진 주행 제어에 효과적임을 입증하였다. [2]~[8]에서는 차량의 동특성 및 파라미터를 정확히 알고 있다는 가정 하에서 슬라이딩 모드 제어, 궤환 선형화 제어 등 다양한 제어기법을 제시하였다. [9]에서는 비선형 관측자를 이용해 차차간 거리(inter-vehicle spacing)의 측정오차가 효과적으로 보정될 수 있음을 보이고 있다. [10]에서는 차차간 상대속도 및 상대가속도를 추정하기 위해 고 이득 관측자를 적용하여 비교적 양호한 결과를 얻고 있다. [12]에서는 직진 주행차량의 적응 궤환 선형화 제어기 설계를 위해 상대거리, 상대속도 및 상대가속도는 센서 혹은 상대거리 측정치의 직접 미분을 통해 얻고, 차량의 가속도 및 저크(jerk)를 관측기를 이용해 추정하는 방법을 제안하여 양호한 성능을 보이고 있다. 그러나 해당 차량의 가속도 및 저크(jerk) 뿐만 아니라 선행차량과의 상대속도, 상대가속도를 직접 얻는 것은 이를 정확히 측정하기 위한 센서의 구현

이 가능한 하지만 상당히 복잡하다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 차량군(platoon)에서의 직진 주행제어를 위해 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용한 적응 궤환 선형화 제어기를 제안한다. 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용하여 차차간 상대속도 및 상대 가속도를 추정한다. 슬라이딩 모드 축차 관측기의 경우 관측대상의 동특성에 관한 수학적 모델이 필요치 않으며, 측정신호의 도함수들을 원하는 차수 만큼 안정적으로 얻을 수 있는 장점이 있다[11]. 시스템 파라미터 중 하나인 차량의 질량은 짐을 싣거나 승객의 승하차 시 부하변동으로 인해 가변적이다. 차량 구동부 동특성 중 시간지연-운전자의 가속 및 제동 페달 조작에 따른 차량 반응 지연 등- 또한 차량속도에 종속된 시변수이다. 이들 시변수들은 축차 관측기로부터의 추정치를 이용하여 표준형 적응제어기만으로 별도의 설계 변경을 하지 않고도 추정할 수 있음을 보이고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다: 제어대상인 차량 모델 및 해결하려는 문제를 2절에서 논한다; 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용한 적응제어기 설계문제 및 제어시스템의 안정도를 3절에서 언급한다; 제안한 방법의 타당성 검토를 위해 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 4절에서 제시하며, 마지막으로 5절에서 결론을 내린다.

### 2. 직진 주행 차량 모델

본 논문에서는 직진 주행 제어기를 설계하기 위하여 차량군에서  $i$  번째에 차량의 단순화 모델을 이용한다. 이 단순화 모델은 [1]과 [2]에서 직진 주행 차량군 제어기 설계를 위해 시스템 모델로 사용하였다. [1]과 [2]에서와 마찬가지로 본 논문에서도 대기온도, 엔진온도, 고도, 점화플러그 상태, 변속기어 상태 등을 배제한 단순화 모델을 이용하기로 한다. 또한 도로 및 환경적인 조건은 무시하기로 한다.

\* 正 會 員 : 漢 拏 大 電 氣 · 電 子 · 制 御 工 學 部 助 教 授 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 漢 拏 大 電 氣 · 電 子 · 制 御 工 學 部 教 授 · 工 博

\*\*\* 正 會 員 : 大 真 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接受日字 : 2001年 3月 22日

最終完了 : 2002年 10月 31日

**가정:** 도로 표면은 수평이며, 바람의 영향은 없고, 모든 차량은 동일한 방향으로만 이동한다.[2]

위의 가정은 참고문헌[2]에서 고려된 것이다.

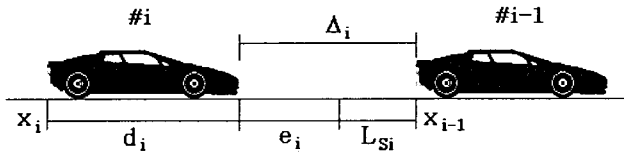


그림 1 추종 주행시의 차량열.  
Fig. 1 Platoon of vehicles.

그림 1은 차량군에서 차차간 구성을 나타내고 있다. 그림 1에서  $i$ 번째 차량과  $i-1$ 번째 차량간의 차차간 상대거리  $\Delta_i$ 는  $i$ 번째 차량의 전방에 설치한 센서를 이용해 측정할 수 있다.  $\Delta_i$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta_i = e_i + L_{si}, \quad \dot{\Delta}_i = \dot{e}_i, \quad \ddot{\Delta}_i = \ddot{e}_i, \quad (1)$$

$$e_i = x_{i-1} - (x_i + d_i) - L_{si}, \quad (2)$$

여기서  $x_i$ 는  $i$ 번째 차량의 뒷 범퍼위치;  $d_i$ 는  $i$ 번째 차량의 길이;  $L_{si}$ 는 차량간에 안전을 유지하기 위해 지정하는 안전거리로서 상수이다.

아래의 그림 2는  $i$ 번째 차량의 단순화 모델이다. 그림 2에서  $K_{di}\dot{x}_i^2$ 는 공기저항에 기인하는 힘이고, 여기서  $K_{di}$ 는 공기의 질량, 무동력 마찰계수(drag coefficient), 차량의 횡단면적 등에 기인하는 계수이다. 상수  $d_{mi}$ 는 차량의 기계적 마찰력(drag)이고;  $m_i$ 는 차량의 질량;  $u_i$ 는 스로틀(가속)/브레이크(감속) 입력;  $F_i$ 는 차량의 엔진 및 제동장치에서 발휘되는 힘이다.

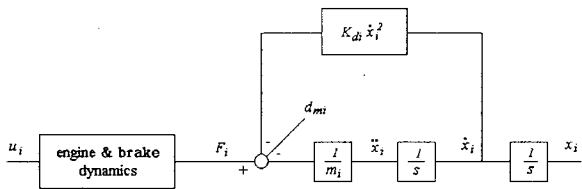


그림 2  $i$ 번째 차량의 단순화 모델  
Fig. 2 Simple model of the  $i$ th vehicle.

$i$ 번째 차량의 직진주행 동특성 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다[2]:

$$m_i \ddot{x}_i = F_i - K_{di} \dot{x}_i^2 - d_{mi}, \quad (3)$$

$$\dot{F}_i = -\frac{F_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} + \frac{u_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)}, \quad (4)$$

여기서  $\mu_{1i}(\dot{x}_i)$ 는  $i$ 번째 차량이  $\dot{x}_i$ 의 속도로 주행 중 일 때 엔진/제동장치의 시정수를 나타낸다. 스로틀 밸브의 개폐에 따른 차량의 가속 반응 시간과 제동장치 조작에 대한 감속반응 시간은 위의 식(4)로 표현된 동특성의 시정수에 비례하는 시간지연을 갖는다. 이러한 시간지연 동특성은 가능하다면 없애는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 식(3)과 식

(4)로 구분되어 있는 차량주행 동특성 모델을 하나의 비선형 모델로 합성한 후 궤환선형화 방식으로 없애고 전체 시스템 특성이 원하는 동특성을 갖도록 하고자 한다. 식(3)을  $F_i$ 에 관해 정리하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$F_i = m_i \ddot{x}_i + K_{di} \dot{x}_i^2 + d_{mi}. \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입해서 정리하면, 아래의 관계식으로 쓸 수 있다.

$$\dot{F}_i = \frac{-1}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)} [m_i \ddot{x}_i + K_{di} \dot{x}_i^2 + d_{mi}] + \frac{u_i}{\mu_{1i}(\dot{x}_i)}. \quad (6)$$

식(3)을 시간에 관해 한번 미분해서 식(6)에 대입하면, 다음의 제어기 설계 모델 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \ddot{x}_i = & -2 \frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{\ddot{x}_i}{\mu_{1i}} \\ & - \frac{K_{di}}{\mu_{1i} m_i} \dot{x}_i^2 - \frac{d_{mi}}{\mu_{1i} m_i} + \frac{u_i}{\mu_{1i} m_i} \end{aligned} \quad (7)$$

[2]에서는 위의 식(7)로 주어진  $i$ 번째 차량의 제어기 설계 모델 식에서 차량의 속도  $\dot{x}_i$ 와 가속도  $\ddot{x}_i$ 는 궤환 선형화 제어를 설계하기 위해서 정확히 아는 값이라고 가정하고 있다. 그러나 차차간 상대거리를 정확히 측정하는 것도 아직 해결해야 할 문제로 남아 있는 현시점에서 차차간 상대속도 및 상대가속도를 정확히 측정한다는 것은 고정밀 센서를 적용해야한다는 문제로 귀착된다. 이는 센서의 신뢰성 보장 및 고가격화라는 측면에서 구현상 까다로운 문제이다. 이와 더불어 차량 자체의 가속도 및 저크(jerk) 역시 정확한 측정이 어려운 점이 있다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 상대거리 및 차량의 속도는 기존의 센서를 이용해 측정 가능하므로, [11]에서 제시한 슬라이딩 모드 추차 관측기를 이용해 차차간 상대속도  $\dot{\Delta}_i$ , 상대가속도  $\ddot{\Delta}_i$ , 차량의 가속도  $\ddot{x}_i$ , 및 저크  $\frac{d}{dt} \ddot{x}_i$ 를 추정하기로 한다. 슬라이딩 모드 추차 관측기는 기존의 관측기와는 달리 관측기 설계 모델이 불필요한 장점이 있다. 승객 및 부하변동에 따른 차량 중량은 매 주행 시 변화하는 파라미터이기 때문에 파라미터 적용이 필요하다. 표준형 파라미터 적용칙을 이용해 이러한 파라미터의 변동 특성에 대처하고자 한다. 관측기로부터 추정된 상태들 및 적용칙으로부터 추정된 파라미터를 이용해 궤환 선형화 제어를 설계한다. 슬라이딩 모드 추차 관측기의 효용성, 표준형 적용 기법 사용의 타당성 및 전체 시스템의 안정도를 다음절에서 논한다. 직진 주행 차량에 대하여 슬라이딩 모드 추차 관측기를 기반으로 설계한 적응 궤환 선형화 제어를 이용해 차차간 상대거리, 상대속도 및 상대가속도의 오차가 원하는 범위 내로 수렴케 하는 것이 본 논문의 목적이다.

### 3. 슬라이딩 모드 추차 관측기 및 제어기 설계

#### A 슬라이딩 모드 추차 관측기 설계

여기서는 차차간 상대속도  $\dot{\Delta}_i$ , 상대가속도  $\ddot{\Delta}_i$  및 상대저크  $\frac{d}{dt} \ddot{\Delta}_i$ 를 추정하고, 이와 별도로 차량의 가속도  $\ddot{x}_i$  및

저크  $\frac{d}{dt} \ddot{x}_i$ 를 추정하기 위해 두가지 슬라이딩 모드 추차 관측기[11]를 적용한다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{1i} &= \xi_{2i} + k_{1i}(\Delta_i - \xi_{1i}) + \beta_{1i}S(\Delta_i - \xi_{1i}) \\ \dot{\xi}_{2i} &= \xi_{3i} + k_{2i}(\xi_{1i} - \xi_{2i}) + \beta_{2i}S(\xi_{1i} - \xi_{2i}) \\ \dot{\xi}_{3i} &= \xi_{4i} + k_{3i}(\xi_{2i} - \xi_{3i}) + \beta_{3i}S(\xi_{2i} - \xi_{3i}) \\ \dot{\xi}_{4i} &= k_{4i}(\xi_{3i} - \xi_{4i}) + \beta_{4i}S(\xi_{3i} - \xi_{4i}) \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_{1i} &= \eta_{2i} + \delta_{1i}(\dot{x}_i - \eta_{1i}) + \gamma_{1i}S(\dot{x}_i - \eta_{1i}) \\ \dot{\eta}_{2i} &= \eta_{3i} + \delta_{2i}(\dot{\eta}_{1i} - \eta_{2i}) + \gamma_{2i}S(\dot{\eta}_{1i} - \eta_{2i}) \\ \dot{\eta}_{3i} &= \delta_{3i}(\dot{\eta}_{2i} - \eta_{3i}) + \gamma_{3i}S(\dot{\eta}_{2i} - \eta_{3i}) \end{aligned} \quad (8.2)$$

여기서  $k_{mi}$ ,  $\beta_{mi}$ ,  $\delta_{mi}$  및  $\gamma_{mi}(m=1\sim 4, n=1\sim 3)$ 는 양의 상수이며;  $S(\cdot)$ 는 스위칭 함수로서 다음과 같다.

$$S(Z) = \begin{cases} 1, & Z > 0 \\ -1, & Z < 0. \end{cases} \quad (8.3)$$

보조오차를  $\zeta_{mi} = \xi_{m-1i} - \xi_{m+1i}$  와  $\omega_{ni} = \eta_{n-1i} - \eta_{n+1i}$  로 정의하면 다음의 결론을 내릴 수 있다.

**보조정리 1** : 시간  $t=0$ 에서의 초기오차 집합  $D_\zeta = \{\zeta_{mi} : |\zeta_{mi}| \leq \beta_{mi}\}$ 에 속하는 모든 보조오차  $\zeta_{mi}$ 에 대해 시간이 지남에 따라 추정오차  $\tilde{\xi}_{mi} = \xi_{m-1i} - \xi_{mi}$ 가 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴하도록 하는 양의 상수  $k_{mi}$ 와  $\beta_{mi}$ 가 존재한다. ■

증명: 참고문헌 [11] 참조.

**보조정리 2** : 시간  $t=0$ 에서의 초기오차 집합  $D_\omega = \{\omega_{mi} : |\omega_{mi}| \leq \gamma_{mi}\}$ 에 속하는 모든 보조오차  $\omega_{mi}$ 에 대해 시간이 지남에 따라 추정오차  $\tilde{\eta}_{ni} = \eta_{n-1i} - \eta_{ni}$ 가 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴하도록 하는 양의 상수  $\delta_{mi}$ 와  $\gamma_{mi}$ 가 존재한다. ■

증명: 참고문헌 [11] 참조.

$m=1, n=1$ 인 경우,  $\xi_{0i}$ 와  $\eta_{0i}$ 는 각각  $\Delta_i$ 와  $\dot{x}_i$ 이다. 즉, 관측기의 추정상태가 지수함수적인 형태로 실제상태로 수렴한다는 것을 의미하는 것이다.

$$\begin{aligned} \xi_{1i} &\rightarrow \Delta_i, \xi_{2i} \rightarrow \dot{\Delta}_i, \xi_{3i} \rightarrow \ddot{\Delta}_i, \xi_{4i} \rightarrow \frac{d}{dt} \ddot{\Delta}_i, \\ \eta_{1i} &\rightarrow \dot{x}_i, \eta_{2i} \rightarrow \ddot{x}_i, \eta_{3i} \rightarrow \frac{d}{dt} \ddot{x}_i. \end{aligned} \quad (9)$$

식(8.1)과 식(8.2)의 변수들을 물리적인 의미가 있는 변수들로 정리하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_i &= \xi_{1i}, \hat{\Delta}_i = \xi_{2i}, \hat{\Delta}_i = \xi_{3i}, \frac{d}{dt} \hat{\Delta}_i = \xi_{4i}, \\ \hat{x}_i &= \eta_{1i}, \hat{x}_i = \eta_{2i}, \frac{d}{dt} \hat{x}_i = \eta_{3i}. \end{aligned} \quad (10)$$

### B 표준형 개환 선형화 적응 제어기

본 논문에서는 제어기를 두 부분으로 나누어 설계한다. 개환 선형화를 위한 적응 개환 제어기와 선행 차량을 추종하기 위한 선행 차량 추종 제어기로 구분하여 설계한다. 개환 선형화 적응제어기는  $\hat{x}_i$ 와  $\hat{\dot{x}}_i$ 를 이용해 설계한다. 파라미터화 기법을 이용하면 식(7)의 제어기 설계모델은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \ddot{x}_i &= -2\frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{\ddot{x}_i}{\mu_{1i}} \\ &\quad - \frac{K_{di}}{\mu_{1i} m_i} \dot{x}_i^2 - \frac{d_{mi}}{\mu_{1i} m_i} + \frac{u_i}{\mu_{1i} m_i} \\ &= \Theta_{1i}^T \Psi_{1i} + \theta_{5i} u_i, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{여기서 } \Theta_{1i}^T = \left[ -2\frac{K_{di}}{m_i} \quad -\frac{1}{\mu_{1i}} \quad -\frac{K_{di}}{m_i \mu_{1i}} \quad -\frac{d_{mi}}{m_i \mu_{1i}} \right]$$

는 파라미터 벡터이고;  $\theta_{5i} = \frac{1}{m_i \mu_{1i}}$ 는 5번째 파라미터이며;  $\Psi_{1i}^T = [\dot{x}_i \ddot{x}_i \dot{x}_i^2 \dot{x}_i^2 1]$ 는 상태 벡터이다. 식(11)을 이용해서 적응 개환 선형화 제어기를 다음과 같이 설계한다.

$$u_i = \frac{1}{\theta_{5i}} \{ \nu_i - \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} \} \quad (12)$$

여기서  $\widehat{\Psi}_{1i}^T = [\hat{x}_i \hat{\dot{x}}_i \hat{x}_i^2 \hat{x}_i^2 1]$ 는 상태벡터  $\Psi_{1i}$ 에 대한 상태추정벡터이고;  $\widehat{\theta}_{5i}$ 와  $\widehat{\Theta}_{1i}$ 는 각각  $\theta_{5i}$ 와  $\Theta_{1i}$ 에 대한 파라미터 추정치이다. 보조정리 2로부터  $\widehat{\Psi}_{1i}$ 가  $\Psi_{1i}$ 로 지수함수적인 빠르기로 수렴한다는 것을 쉽게 알 수 있다.

이제 식(12)의 적응 개환 선형화 제어기를 이용하여 정확한 선형화가 가능한지 알아보기로 한다. 식(12)를 식(11)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \ddot{x}_i &= \Theta_{1i}^T \Psi_{1i} + \frac{\theta_{5i} - \widehat{\theta}_{5i} + \widehat{\theta}_{5i}}{\widehat{\theta}_{5i}} \{ \nu_i - \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} \} \\ &= \Theta_{1i}^T \Psi_{1i} - \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \widehat{\theta}_{5i} u_i + \nu_i. \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)의 우변에  $\Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} - \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i}$ 를 더하고 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_i = \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \widehat{\theta}_{5i} u_i + \nu_i, \quad (14)$$

여기서  $\widehat{\Theta}_{1i} = \Theta_{1i} - \widehat{\Theta}_{1i}$ 와  $\widehat{\theta}_{5i} = \theta_{5i} - \widehat{\theta}_{5i}$ 는 파라미터 추정 오차이며;  $\widehat{\Psi}_{1i} = \Psi_{1i} - \widehat{\Psi}_{1i}$ 는 상태추정오차이다. 보조오차를  $\ddot{x}_{ei} = \ddot{x}_i - \hat{\ddot{x}}_i$ 로 정의하면 선행차량 추종 제어 입력  $\nu_i$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\nu_i = \frac{d}{dt} \ddot{x}_{ei} + \lambda_i \ddot{x}_{ei}, \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_{ei} = \frac{d}{dt} \hat{\ddot{x}}_i + a_{1i} \hat{\ddot{x}}_i + a_{2i} \hat{\dot{x}}_i + \frac{d}{dt} \hat{x}_i, \quad (16)$$

여기서  $\hat{e}_i$ 는  $e_i$ 의 추정치이고;  $\lambda_i(>0)$ 는 설계 파라미터 이며;  $\ddot{x}_n$ 는 보조 기준입력이다. 식(15)를 식(14)에 대입해서 정리하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_i = \frac{d}{dt} \ddot{x}_n + \lambda_i \ddot{x}_{ei} + \widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} + \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i}, \quad (17)$$

여기서  $\widehat{\Psi}_{2i} = [\hat{x}_i \hat{\dot{x}}_i \hat{\ddot{x}}_i \hat{x}_i^2 \ 1 \ u_i]$ 는 상태추정 벡터 이고;  $\widehat{\Theta}_{2i} = [\widehat{\Theta}_{1i}, \widehat{\Theta}_{5i}]^T$ 이고;  $\widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} = \widehat{\Theta}_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \widehat{\Theta}_{5i} u_i$ 는 파라미터 추정오차에 관한 항이다. 식(17)의 우변에  $\frac{d}{dt} \hat{x}_i - \frac{d}{dt} \ddot{x}_i$ 를 더하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \ddot{x}_{ei} = -\lambda_i \ddot{x}_{ei} - \widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} - \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \frac{d}{dt} \hat{x}_i. \quad (18)$$

Lyapunov 함수후보를  $V_{2i} = \frac{1}{2} \ddot{x}_{ei}^2 + \frac{1}{2} \widehat{\Theta}_{2i}^T \Gamma^{-1} \widehat{\Theta}_{2i}$ 와 같이 정의하고 그 1계 도함수를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} = & -\lambda_i \ddot{x}_{ei}^2 - \widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} \ddot{x}_{ei} - \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} \ddot{x}_{ei} \\ & + \widehat{\Theta}_{2i}^T \Gamma^{-1} \dot{\widehat{\Theta}}_{2i} + \frac{d}{dt} \hat{x}_i \ddot{x}_{ei}. \end{aligned} \quad (19)$$

파라미터 추정오차 항  $\widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} \ddot{x}_{ei}$ 을 상쇄시키기 위해 아래와 같이 표준형 파라미터 적응칙을 설계한다.

$$\dot{\widehat{\Theta}}_{2i} = \Gamma \widehat{\Psi}_{2i} \ddot{x}_{ei}, \quad \Gamma = \Gamma^T > 0. \quad (20)$$

이제까지의 설계 과정으로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

**정리** : 식(5)와 식(6)의 차량 단순화 모델에 대하여,  $e_i$ ,  $\dot{e}_i$  및  $\ddot{e}_i$ 가 시간이 지남에 따라 감소하도록 하는 식(8)의 측차 관측기와 식(20)의 적응칙을 이용하는 식(12)의 제어입력의  $\lambda_i \in R$  및  $a_{1i}, a_{2i} \in R$ 가 존재한다. ■

**증명** : 파라미터 적응칙 식(20)을 식(19)에 대입하면, 아래의 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} = & -\lambda_i \ddot{x}_{ei}^2 - \widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} \ddot{x}_{ei} - \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} \ddot{x}_{ei} \\ & + \widehat{\Theta}_{2i}^T \widehat{\Psi}_{2i} \ddot{x}_{ei} + \frac{d}{dt} \hat{x}_i \ddot{x}_{ei}. \end{aligned} \quad (21)$$

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{2i} = -\lambda_i \ddot{x}_{ei}^2 - \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} \ddot{x}_{ei} + \frac{d}{dt} \hat{x}_i \ddot{x}_{ei}. \quad (22)$$

$\widehat{\Psi}_{1i}$ 와  $\frac{d}{dt} \hat{x}_i$ 는 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴하므로 다음의 부등 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} \leq & -\lambda_i \ddot{x}_{ei}^2 + \varepsilon_i \ddot{x}_{ei} \\ \leq & -\frac{\lambda_i}{2} \ddot{x}_{ei}^2 - \frac{\lambda_i}{2} \ddot{x}_{ei}^2 + \varepsilon_i \ddot{x}_{ei} \end{aligned} \quad (23)$$

위의 부등식을 제곱꼴로 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} \leq & -\frac{\lambda_i}{2} \ddot{x}_{ei}^2 - \frac{\lambda_i}{2} \left( \ddot{x}_{ei} - \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} \right)^2 + \frac{\varepsilon_i^2}{2\lambda_i} \\ \leq & -\frac{\lambda_i}{2} \ddot{x}_{ei}^2 + \frac{\varepsilon_i^2}{2\lambda_i} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $\varepsilon_i = \left| \Theta_{1i}^T \widehat{\Psi}_{1i} + \frac{d}{dt} \hat{x}_i \right|$ 는 지수함수적인 빠르기로 사라지는 오차 항이다. 따라서  $V_{2i}$ 는 uniformly ultimately bounded하며,  $\ddot{x}_{ei}$ 는 시간이 지남에 따라 점차 감소하게 된다. 이에 따라  $\widehat{\Theta}_{2i}$ ,  $\widehat{\Theta}_{1i}$ ,  $\widehat{\Theta}_{5i}$  및 페루프 내의 모든 신호들은 uniformly ultimately bounded하다.

식(16)을 시간에 관해 한번 적분하면, 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{e}_i + a_{1i} \dot{e}_i + a_{2i} e_i = \ddot{x}_n - \ddot{x}_i \quad (25)$$

위의 식에  $\ddot{e}_i + a_{1i} \dot{e}_i + a_{2i} e_i - \ddot{e}_i - a_{1i} \dot{e}_i - a_{2i} e_i$ 를 더하고 정리하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{e}_i + a_{1i} \dot{e}_i + a_{2i} e_i + \varepsilon_i = \ddot{x}_{ei}, \quad (26)$$

여기서  $\varepsilon_i = (\ddot{e}_i - \ddot{e}_i) + a_{1i}(\dot{e}_i - \dot{e}_i) + a_{2i}(e_i - e_i)$ 는 상대거리, 상대속도 및 상대가속도 추정값과 실제값의 오차로 구성된 항이다. 식(1)과 식(10)으로부터  $\varepsilon_i$ 의 우변 세 항은 각각 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴한다. 또한 식(23)의 결과로부터  $\ddot{x}_{ei}$ 는 시간이 지남에 따라 점차 감소한다는 것을 알 수 있다. 따라서  $e_i$ ,  $\dot{e}_i$ ,  $\ddot{e}_i$ 는 시간이 지남에 따라 감소하며  $\Delta_i$ ,  $\dot{\Delta}_i$  역시 감소하게 됨을 알 수 있다. 이에 따라  $\Delta_i$ 는 안전거리  $L_{si}$ 내로 점차 수렴하게 된다. ■

지금 까지 직진 주행 차량에 대하여 슬라이딩 모드 측차 관측기를 기반으로 설계한 적응 궤환 선형화 제어기의 수학적 타당성을 검토하였다. 차량의 직진 주행 모델에 대한 파라미터 적응형 궤환 선형화 제어기 및 슬라이딩 모드 측차 관측기를 정리하면 표 1과 같다. 표 1로 주어진 전체 시스템에 대한 블록선도를 그림 3에 나타내었다.

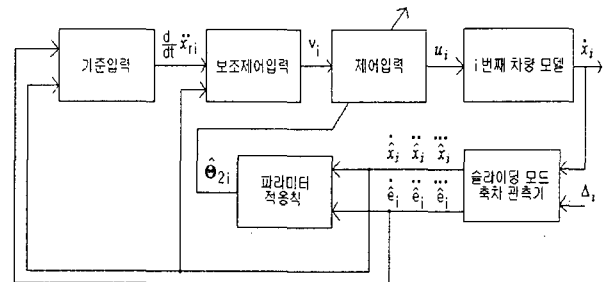


그림 3  $i$ 번째 차량의 단순화 모델에 대한 제어시스템  
Fig. 3 The control system for simple model of the  $i$ th vehicle.

그림 3으로부터 알 수 있듯이 차량의 주행 속도  $\dot{x}_i$ 와 선행 차량간의 상대거리  $\Delta_i$ 는 측정하는 값이다. 이 측정치는 식 (8)의 슬라이딩 모드 추차 관측기에서 상대속도, 상대가속도 및 차량의 주행가속도를 추정하기 위해 사용한다. 관측기에서 추정된 값들은 식(20)의 적응칙에서 차량 파라미터를 추정하기 위해서 사용되며, 식(16)의 기준입력 계산을 위해서도 사용된다. 계산된 기준입력은 식(15)의 보조제어입력 계산에 이용된다. 추정 파라미터, 보조제어입력 등은 식(12)의 제어입력을 계산하기 위해 이용하여 차량에 인가하면 된다.

표 1 전체 시스템의 수학적 표현식  
Table 1 equations of the over all system

제어기 설계 모델 :	
$\frac{d}{dt} \ddot{x}_i = -2 \frac{K_{di}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{\ddot{x}_i}{\mu_i}$	
$- \frac{K_{di}}{\mu_i m_i} \dot{x}_i^2 - \frac{d_{mi}}{\mu_i m_i} + \frac{u_i}{\mu_i m_i}$	
$= \Theta_{1i}^T \Psi_{1i} + \theta_{5i} u_i,$	(11)
제어입력 :	$u_i = \frac{1}{\theta_{5i}} \{ \nu_i - \widehat{\Theta}_{1i}^T \Psi_{1i} \}$
보조제어입력 :	$\nu_i = \frac{d}{dt} \ddot{x}_{ri} + \lambda_i \ddot{x}_{ei},$
기준입력 :	$\frac{d}{dt} \ddot{x}_{ri} = \frac{d}{dt} \hat{e}_i + a_{1i} \hat{e}_i + a_{2i} \hat{e}_i + \frac{d}{dt} \hat{x}_i,$
파라미터 적응칙 :	$\widehat{\Theta}_{2i} = \Gamma \Psi_{2i} \ddot{x}_{ei}, \quad \Gamma = \Gamma^T > 0.$
추차 관측기(상대속도, 상대가속도) :	
$\dot{\xi}_{1i} = \xi_{2i} + k_{1i}(\Delta_i - \xi_{1i}) + \beta_{1i} S(\Delta_i - \xi_{1i})$	
$\dot{\xi}_{2i} = \xi_{3i} + k_{2i}(\xi_{1i} - \xi_{2i}) + \beta_{2i} S(\xi_{1i} - \xi_{2i})$	
$\dot{\xi}_{3i} = \xi_{4i} + k_{3i}(\xi_{2i} - \xi_{3i}) + \beta_{3i} S(\xi_{2i} - \xi_{3i})$	(8.1)
$\dot{\xi}_{4i} = k_{4i}(\xi_{3i} - \xi_{4i}) + \beta_{4i} S(\xi_{3i} - \xi_{4i})$	
추차 관측기(차량 가속도) :	
$\dot{\eta}_{1i} = \eta_{2i} + \delta_{1i}(\dot{x}_i - \eta_{1i}) + \gamma_{1i} S(\dot{x}_i - \eta_{1i})$	
$\dot{\eta}_{2i} = \eta_{3i} + \delta_{2i}(\eta_{1i} - \eta_{2i}) + \gamma_{2i} S(\eta_{1i} - \eta_{2i})$	(8.2)
$\dot{\eta}_{3i} = \delta_{3i}(\eta_{2i} - \eta_{3i}) + \gamma_{3i} S(\eta_{2i} - \eta_{3i})$	

4. 시뮬레이션 결과

여기서는 슬라이딩 모드 추차 관측기를 이용한 적응 궤환 선형화 제어기법의 타당성을 수치예를 통해 검토해보기로 한다. 세대의 차량으로 하나의 차량군을 형성하여 시뮬레이션에 이용하기로 한다. 각각의 차량 파라미터는 [2]에서 사용한 것으로 아래의 표 2에 나타내었다. 차량 추종 순서는 선두에 Daihatsu Charade CLS 그 뒤를 Buick Regal Custom이 다시 그 뒤를 BMW 750iL이 추종하는 것으로 설정하였다. 승객수 및 각각의 몸무게는 다음과 같다: Daihatsu Charade CLS-91[Kg] 각각 3명; Buick Regal Custom- 64[Kg] 각각 2명; BMW 750iL-45, 45, 91, 59[Kg] 4명.

표 2 차량별 파라미터

Table 2 The parameters of each vehicle

차종	공차 중량	횡단 면적	마찰계수 (drag coefficient)	시정수
Daihatsu Charade CLS	916 Kg	1.9 m <sup>2</sup>	K <sub>d</sub> =0.44 Kg/m	0.2s
Buick Regal Custom	1464 Kg	2.2 m <sup>2</sup>	K <sub>d</sub> =0.49 Kg/m	0.25s
BMW 750iL	1925 Kg	2.25 m <sup>2</sup>	K <sub>d</sub> =0.51 Kg/m	0.2s

$i=1,2,3$ 으로 놓고 적응 제어기의 이득은 다음과 같이 설정하였다:  $a_{1i}=10, a_{2i}=5, \lambda_i=5$ . 차차간 안전거리  $L_{si} = 1[m]$ 로 하였다. 파라미터 적응칙의 적응이득 행렬  $\Gamma_i$ 의 대각요소는 모두 0.00002로 놓았으며, 슬라이딩 모드 추차 관측기의 이득은  $k_{1,2,3,4i} = [100 \ 50 \ 25 \ 10], \beta_{1,2,3,4i} = 0.001, \gamma_{1,2,3i} = 0.001, \delta_{1,2,3i} = [100 \ 50 \ 10]$ 로 설정하였다. 파라미터 추정치의 초기값은 실제값의 70[%]를 주었다. 승객을 포함한 차량의 전체 중량은 주행 중에는 변하지 않는 것으로 하였다. 선두 차량의 속도 궤적은 그림 4에 나타난 것과 같다. 최대속도는 120[km/hr]이다.

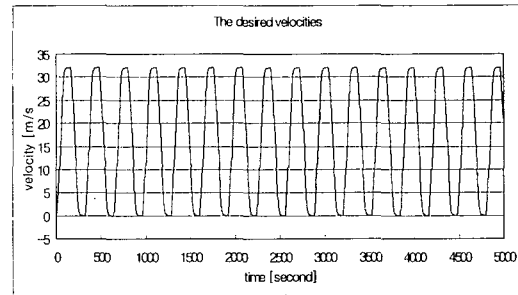


그림 4 선두차량의 기준 속도  
Fig. 4 The desired velocity.

그림 5는 상대거리 및 상대거리 추정치를 나타내고 있다. 상대거리는 센서를 이용해 정확히 측정하는 값이고 이에 대한 추정치는 슬라이딩 모드 추차 관측기로 추정하였다. 그림 5에 나타난 것과 같이 상대거리와 그 추정치는 그래프 상으로는 구분이 안될 정도로 추정이 잘 되고 있으며, 구간별 값도 소수점 3째 자리까지 동일함을 볼 수 있다. 그림 5는 상대거리가 안전거리  $L_{si} = 1[m]$ 를 비교적 잘 유지하고 있으며 또한 상대거리 오차는 최대  $\pm 5[cm]$ 를 초과하지 않는 것을 볼 수 있다.

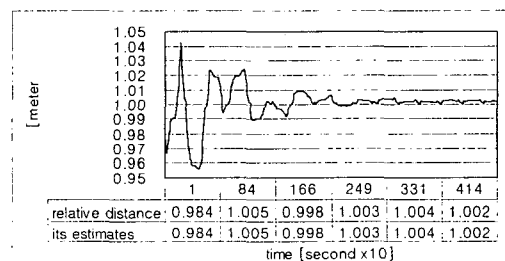


그림 5-a 선두차량의 기준거리와의 상대거리 및 추정치  
Fig. 5-a The relative distance and its estimates of #1 to ref.

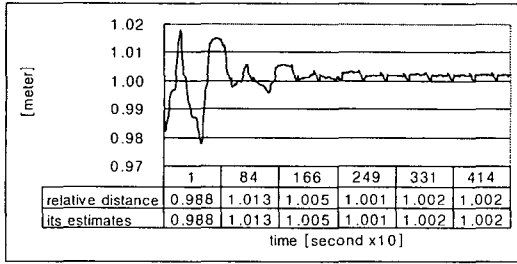


그림 5-b 두 번째 차량의 상대거리 및 그 추정치  
Fig. 5-b The relative distance and its estimates of #2 to #1.

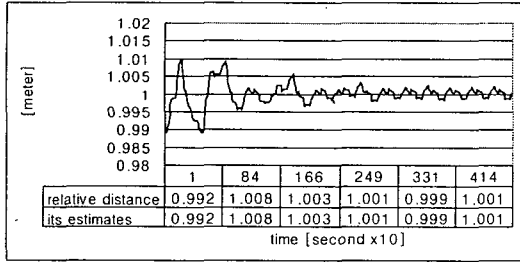


그림 5-c 마지막 차량의 상대거리 및 그 추정치  
Fig. 5-c The relative distance and its estimates of #3 to #2.

그림 6은 각 차량간 상대속도 및 상대속도 추정치를 나타내고 있다. 상대속도 추정치 또한 실제 상대속도와 거의 동일하여 그림 6의 그래프로는 구분할 수 없을 정도이다. 구간별 값을 보더라도 동일한 값을 알 수 있다. 상대속도 추정치도 슬라이딩 모드 측차 관측기를 통해 추정하는 값이다. 차차간 상대속도는 원하는 값이 0[m/s]이다. 즉, 차차간 속도차이가 없어야 한다는 것이다. 그림 6은 상대속도 오차가 거의 '0'에 가까운 것을 보여주고 있으며, 이는 추정치를 이용하여 설계한 표준형 적응 궤환 선형화 제어기의 타당성을 보여주는 시뮬레이션 결과라 할 수 있다.

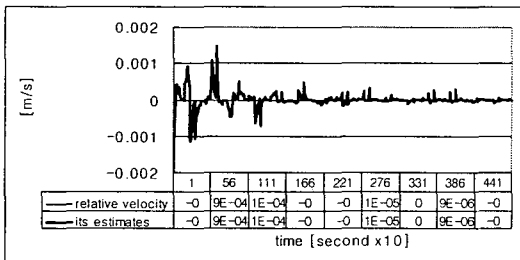


그림 6-a 기준속도에 대한 선두차량의 상대속도 및 그 추정치  
Fig. 6-a The relative velocity and its estimates of #1 to ref.

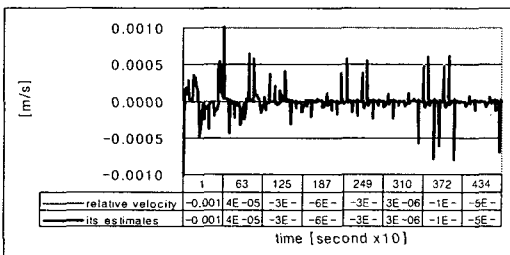


그림 6-b 두 번째 차량의 선두차량과의 상대속도 및 그 추정치  
Fig. 6-b The relative velocity and its estimates of #2 to #1.

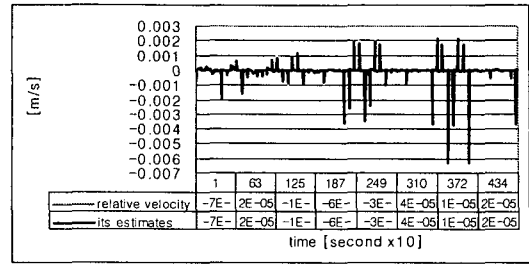


그림 6-c 마지막 차량의 두 번째 차량과의 상대속도 및 추정치  
Fig. 6-c The relative velocity and its estimates of #3 to #2.

그림 7은 각 차량간 상대가속도 및 상대가속도 추정치를 나타내고 있다. 상대가속도 추정치 또한 실제 상대가속도와 거의 동일하여 그림 7의 그래프로는 구분할 수 없을 정도이고, 구간별 값도 동일한 값을 알 수 있다. 상대가속도 추정치도 슬라이딩 모드 측차 관측기를 통해 추정한다. 차차간 상대가속도 역시 원하는 값이 0[m/s<sup>2</sup>]이다. 이는 차량간에 상대가속도 차이가 없어야 한다는 것을 의미한다. 그림 7은 상대가속도 오차가 거의 '0'에 가까운 것을 보여주고 있다.

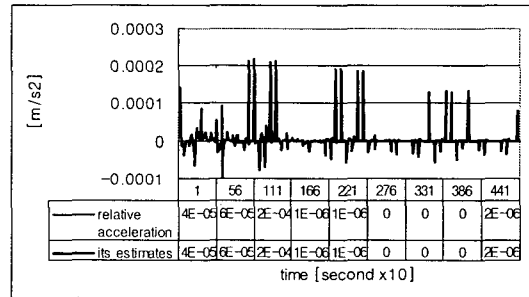


그림 7-a 기준가속도에 대한 선두차량의 상대가속도 및 그 추정치  
Fig. 7-a The relative acceleration and its estimates of #1 to ref.

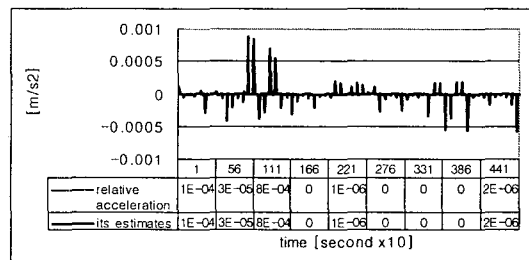


그림 7-b 두 번째 차량의 선두차량에 대한 상대속도 및 그 추정치  
Fig. 7-b The relative acceleration and its estimates of #2 to #1.

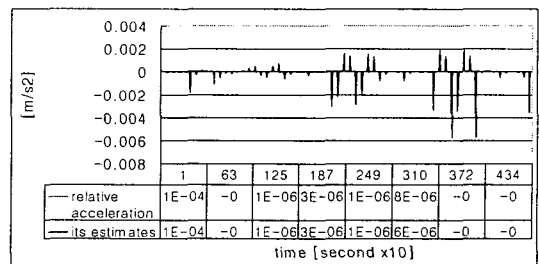


그림 7-c 마지막 차량의 두 번째 차량과의 상대가속도 및 추정치  
Fig. 7-c The relative acceleration and its estimates of #3 to #2.

다음의 그림 8은 각 차량의 파라미터 노름(norm)을 추정 한 결과를 보여주고 있다. 각 파라미터의 초기 값은 실제 값의 70[%]에 해당하는 값으로 설정하였다. 적응칙은 식(20)의 표준형 gradient 방법을 이용하였다. 시간이 지남에 따라 추정치 노름이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그러나 안정된 범위로 수렴하기 까지 비교적 오랜 시간이 걸리는 것을 볼 수 있다. 이는 표준형 적응칙이 아닌 수렴속도를 보완한 적응칙을 사용하면 해결할 수 있는 문제이며, 본 논문의 주안점이 아니므로 다루지 않기로 한다.

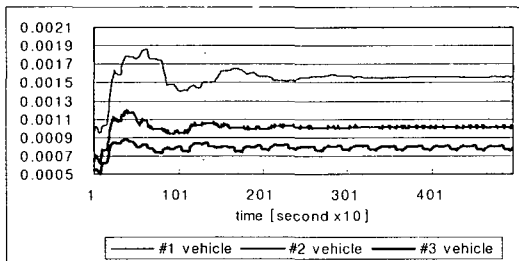


그림 8 차량별 파라미터 추정치 노름(norm)

Fig. 8 The parameter estimates norms of each vehicle.

## 5. 결 론

본 논문에서는, 차량군 내의 차량의 직진주행제어를 위해 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용한 적응 궤환 선형화 제어기를 설계하였다. 슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용하여 관측기 설계 모델이 없이 차차간 상대속도, 상대가속도, 상대저크 및 차량의 가속도 및 저크의 추정이 가능함을 보였다. 이들 추정치를 이용한 표준형 적응 궤환 선형화 제어기의 설계 및 적용 가능성을 수학적으로 입증하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

## 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] M. Tomizuka, and J. K. Hedrick, "Automated Vehicle Control for IVHS Systems," *IFAC 12th Triennial World Congress*, Sydney, Australia, 1993, pp.109-112.
- [5] St. Germann, and R. Isermann, "Modelling and Control of Longitudinal Vehicle Motion," *Proceedings of the American Contr. Conf.* Baltimore, Maryland, 1994, pp.1-5.
- [6] D. N. Godbole, and J. Lygeros, "Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon," *Proceedings of the American Contr. Conf.* 1994, Vol.1, pp.398-402.
- [7] 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.*, 1992, pp.1753-1757.
- [8] 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*, 1993, Vol.2, pp.1885-1890.
- [9] 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, June 1995, pp.3106-3110.
- [10] S. Seshagiri, "Longitudinal Adaptive Control of a Platoon of Vehicles," *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, California, June 1999, pp.3681-3685.
- [11] E. S. Kim, Y. N. Kim and C. H. Lee, "Cascade Sliding Observer Design For n-th Order Derivatives of Measurement Value," *The Trans. of the KIEE*, Vol.50, No. 2, pp.80-86, Feb. 2001.
- [12] E. S. Kim, D. H. Kim, H. W. Yang, "Observer Based Adaptive Control of Longitudinal Motion of Vehicles," *The Trans. of the KIEE*, Vol.50, No.3, pp.130-135, March 2001.

저 자 소 개



**김응석(金應錫)**

1962년 11월 9일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1994년 KIST Post Doc. 1994년~1999년 삼성종합기술원 전문연구원. 1999년~현재 한라대학교 전기전자제어공학부 조교수.

Tel : (033) 760-1248, E-mail : eskim@halla.ac.kr



**김철진(金澈珍)**

1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1991-1995년 생산기술연구원, KETI 제어기기 연구실장. 1995-현재, 한라대학교 전기전자제어 공학부 교수

Tel : (033) 760-1245, E-mail : cjkim@halla.ac.kr



**이형찬(李炯燦)**

1959년 7월 4일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994년~현재 대전대학교 전기공학과 부교수

Tel : (031) 539-1913

E-mail : hcrhee@road.daejin.ac.kr