

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0033

## 슬라이딩 모드를 이용한 차량 간격 자동 제어 알고리즘에 관한 연구

### A Study on the Autonomous Cruise Control using the Sliding Mode

이 동 현\*, 장 광 수\*\*  
Donghyun Lee, Kwangsoo Chang

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to design the controller for longitudinal vehicle following which makes the vehicle follow the lead vehicle and keeps a safety distance without human driver operation.

This paper presents a sliding mode control algorithm for the ACC system. The controller is based on three sliding surfaces. Each surface plays an individual control - deviation control, throttle control and brake control.

In addition to sliding mode control, we propose some additional schemes to enhance controller performance. The first one is a gear shift-down controller which makes tractive force increase with a change of gear ratio. The other is a predictive correction method which reduces slinky effect.

주요기술용어 : ACC , AVCS , Sliding mode control(슬라이딩 모드 제어)

#### 1. 서 론

차량 간격 자동 제어(ACC : Adaptive Cruise Control)란 차량의 속도를 제어하는 기존의 정속 제어와 달리 차량간 거리를 원하는 간격으로 운전자의 조작 없이 유지시키는 장치로 충분한 시스템이 구축된 후에는 운전자에 대한 운전의 편

의성을 증대시키고 주행 안전성 향상시키며 도로 용량 증가를 기대할 수 있다. 차량 간격 제어에 대한 연구는 차량간 통신의 유무에 따라 크게 두 분야로 나눌 수 있는데 차량간의 통신없이 선행 차량을 추종하는 제어 방식을 ACC라 하고 차량간 통신이 존재하는 경우를 차량군 제어(vehicle platoon control)라 한다.<sup>1,2)</sup>

본 논문은 상기한 바와 같이 기존에 발표된 ACC 관련 제어기 방식과 달리<sup>2,3,4)</sup> 차량 파워트레인의 비선형 모델<sup>5)</sup>을 이용, 슬라이딩 제어 이론을 적용한 차량 간격 자동 제어기를 개발하였

\* 홍익대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 홍익대학교 기계공학과

다. 슬라이딩 모드 제어 이론은 차량군 제어 (vehicle platoon control)와 같이 비선형 시스템 제어에 우수한 성능을 가지는 것으로 알려져 있어<sup>5, 6)</sup> 차량과 같은 비선형성이 강한 시스템의 제어기를 설계하는데 용이하다. 또한 본 논문에서는 기존의 슬라이딩 모드 제어 방법을 보완하기 위해 두 가지의 추가적인 제어기를 설계하였다. 하향변속제어(shift down control)는 제어력이 불충분할 경우 기어단수를 낮추어 구동력을 증가시키게 되고, 예측보정방법(predictive correction method)은 차속 변화를 예측하여 제어력을 수정하는 방법으로 추종 오차 증폭 현상. 차량 (slinky effect)을 감소시키게 된다.

## 2. 간격 자동 제어

ACC 시스템의 제어 목적은 추종차량의 속도  $v_f$ 를 선행차량의 속도  $v_l$ 와 같이 유지하면서 선행 차량과의 차간 거리  $x_r$ 을 안전거리  $S_d$ 에 수렴하도록 하는 것이다. 따라서 ACC 제어는 두 개의 오차값, 즉 선행 차량과의 상대 속도  $v_r$ 와 상대거리에서 안전거리를 뺀 일탈거리  $\delta$ 를 0으로 수렴시키는 것을 목적으로 한다. ACC에서 발생하는 두 개의 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} v_r &= v_l - v_f \\ \delta &= x_r - S_d \end{aligned} \quad (1)$$

Fig.1은 ACC 시스템의 개념도이다.

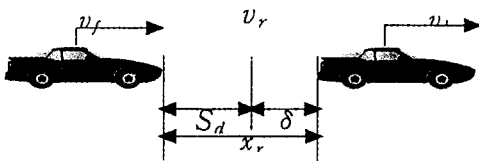


Fig. 1 Structure of ACC System

이와 같은 제어를 수행하기 위해서 추종차량에

부착된 제어기는 거리센서로부터 상대거리와 상대속도 정보를 얻고 차량에 부착된 센서를 통해 차속 및 가속 정보를 얻어 추종 차량이 내어야 할 가속도를 얻고, 적절한 알고리즘을 통해 스로틀 또는 브레이크를 구동시키는 신호를 발생시키게 된다. 제어기의 전체 구성은 Fig.2와 같이 나타낼 수 있다.

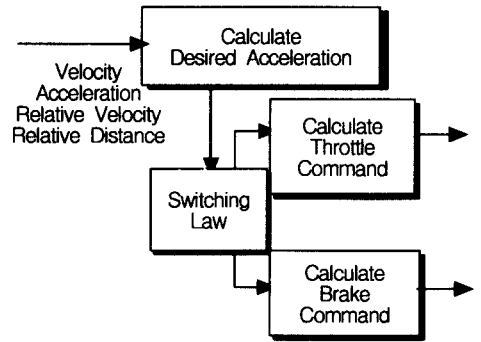


Fig.2 Controller Structure of ACC

## 3. 간략화 된 차량 모델

본 논문의 슬라이딩 모드 제어기의 설계에 사용될 차량 모델은 기존의 논문<sup>2, 5)</sup>에서 발표된 차량의 상태 방정식 중 중요도가 높은 3개의 상태 변수를 추출한 모델로 엔진맵을 사용한 비선형 파워트레인 모델과 선형 1차 브레이크 모델이다.

흡기다기관은 공기유량은 다음과 같은 연속 방정식 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} \\ \begin{cases} \dot{m}_{ai} = MAX \cdot TC(a) \cdot PRI(m_a) \\ \dot{m}_{ao} = \dot{m}_{ao}(\omega_e, m_a) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\dot{m}_{ai}$ ,  $\dot{m}_{ao}$ 는 각각 유입 유출되는 공기유량이고  $MAX$ 는 완전 개도된 스로틀을 통과하는 최대 공기유량,  $TC$ 는 스로틀 각  $a$ 에 대한 스로틀의 특성함수(throttle characteristic)이다.  $PRI$ 는 흡기다기관 압력과 대기압의 비에 따른

특성함수로 이상 기체 상태 방정식에  $m_a$ 를 대입하여 계산된다. 또한  $\dot{m}_{ao}$ 는 엔진의 회전속도  $\omega_e$ , 흡기다기관 내의 공기질량  $m_a$ 를 파라미터로 엔진맵에서 결정된다.

엔진의 회전 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$J_{eq} \dot{\omega}_e = T_{net} - T_{load}$$

$$\begin{cases} T_{net} = T_{net}(\omega_e, \dot{m}_{ao}) \\ J_{eq} = J_e + J_t + R_g^2 R_d^2 (J_{dt} + J_{wf} + h_f^2 M) \\ T_{load} = R_g R_d (T_b + T_r + C_d h_f^3 (R_g R_d)^2 \omega_e^2) \end{cases} \quad (3)$$

이때  $T_{net}$ 은 엔진의 정미토크로 엔진의 회전속도  $\omega_e$ 와 흡기다기관으로부터 유입되는 공기유량  $\dot{m}_{ao}$ 으로부터 엔진맵에서 결정된다.  $J_{eq}$ 은 엔진의 회전관성  $J_e$ 부터 차체 질량  $M$ 까지를 포함하는 등가 회전 관성이다. ( $J_t$ : 토크컨버터의 회전 관성,  $J_{dt}$ : 드라이브 트레인의 회전관성,  $J_{wf}$ : 전륜의 회전관성,  $R_g$ : 기어비,  $R_d$ : 최종단의 기어비)  $T_{load}$ 는 엔진에 걸리는 부하로 브레이크 토크  $T_b$ , 구름저항  $T_r$ , 공기 저항을 포함하는 값이다. 여기서  $C_d$ 는 공기 저항 계수,  $h_f$ 는 차륜의 동적 회전 반지름이다.

식(3)으로부터 차량의 속도는 다음과 같이 얻어진다.

$$v = R_g R_d h_f \omega_e \quad (4)$$

마지막으로 브레이크 구동기의 모델은 선형 1차식을 사용한다.

$$\tau_b \dot{T}_b + T_b = T_{b,c} \quad (5)$$

여기서  $\tau_b$ 는 브레이크 시스템의 시정수이고,  $T_b$ 는 브레이크 토크,  $T_{b,c}$ 는 입력되는 브레이크 토크명령이다.

#### 4. 차량 간격 규칙

ACC 시스템에서 가장 중요한 작업 중 하나는 차량 주행 중 선행 차량과 유지해야 할 간격을 결정하는 것이다. 차량 간격을 결정하는 방법에 따라 도로 용량에 많은 차이를 가져오고 제어 성능도 차이가 크다. 본 논문에서는 일정 간격 규칙(constant separation)과 일정 시간 간격 규칙(constant time-headway)을 혼합한 다음과 같은 규칙을 사용하였다.

$$S_d = h v_f + \Delta_{min} \quad (6)$$

여기서  $h$ 는 시간 간격이고,  $\Delta_{min}$ 은 최소 차량 간격이다. 본 논문에서는  $h$ 를 0.3(sec.),  $\Delta_{min}$ 은 2(m)로 설정하였다.

#### 5. 슬라이딩 모드 제어기

식(2)~(5)의 차량 모델과 식(1)로 표현되는 ACC의 제어 목표, 안전거리에 관련된 식(6)은 차량이 정속도 일 경우 canonical 형태로 결합하면 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_a = f(\omega_e, m_a) + g(a) \quad (7)$$

$$\dot{T}_b = f(T_b) + g(T_{b,c}) \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_e = f(m_a, \omega_e, T_b) \quad (9)$$

식(7)~(9)으로부터 우리는 다중 슬라이딩 기법을 적용할 수 있는 세 개의 슬라이딩 면을 결정하였다. 식(9)에 면을 설정하여  $m_{a,des}$  또는  $T_{b,des}$ 를 얻고 식(7)과 (8)의 각각에 면을 설정하여 스로틀 각  $a$ 와 브레이크 입력 토크  $T_{b,c}$ 를 얻게 된다. 이때  $\dot{\omega}_e$ 에 관한 식은 입력항이 존재하지 않기 때문에 이 변수에 직접 면을 설정할 수 없으므로 중간에  $\delta$ 에 관련된 식을 이용하여 슬

라이딩 면을 설정한다.

### 5.1 일탈거리에 관련된 슬라이딩 면

첫 번째 면의 설정은 ACC의 두 개의 오차 값, 즉 상대속도  $v_r$  와 일탈거리  $\delta$  로 구성하여야 한다. 그러나  $v_r$  을 미분하게 되면 선행차량의 가속도항이 나오게 되고 통신을 사용하지 않는 한 이 가속도 값을 직접적으로 얻을 수 있는 방법이 없기 때문에 ACC 제어기에서 첫 번째 면은 선행차량과의 일탈거리만으로 설정한다. 따라서 첫 번째 면은 식(1)로부터

$$S_1 = \delta = x_r - S_d \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \dot{\delta} = v_r - \dot{S}_d \\ &= v_r - h \dot{v}_f = -\eta_1 F_s(S_1) \quad (11) \\ \eta_1 > 0, F(S_1) &= S_1 \end{aligned}$$

이다. 식(12)에서 우변은 모델의 불확실성에 대한 영향을 보상하기 위한 항으로  $\eta_1$  은 슬라이딩 제어기의 수렴 특성을 결정하는 설계 파라미터 값이고,  $F_s$  는 슬라이딩 함수(sliding function)로서 부호(sign)함수 또는 포화(saturation)함수 등이 쓰인다.

윗 식으로부터 계산되어질 수 있는 요구 가속도  $\dot{v}_{f,des}$ ,  $\dot{\omega}_{e,des}$  값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{v}_{f,des} = \frac{v_r + \eta_1 F_s(S_1)}{h} \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_{e,des} = R_g R_d h_f \dot{v}_{f,des} \quad (13)$$

첫 번째 면으로부터 얻어진 값은 거리센서로부터 측정 또는 계산된 선행차량과의 상대속도와 상대거리를 입력받아 추종 오차를 0으로 만드는 최적의 가속도 값이 된다.

### 5.2 스로틀 밸브의 구동과 연관된 슬라이딩 면

두 번째 슬라이딩 면은 식(10)으로부터 얻어진 요구 가속도  $\dot{\omega}_{e,des}$  를 낼 수 있는 스로틀 밸브의 개도량을 결정하는 면으로 차량의 가속 특성을 결정하게 된다.

스로틀 개도량의 결정은 스로틀을 통한 공기 유입으로부터 차량 가속도가 생성되는 일련의 상태 방정식을 역으로 계산하여 결정하게 된다. 우선적으로  $\dot{\omega}_{e,des}$  를 얻을 수 있도록 하는 엔진의 요구 토크  $T_{net,des}$  는 식(3)으로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$T_{net,des} = J_{eq} \dot{\omega}_{e,des} + T_{load} \quad (14)$$

다음은  $T_{net,des}$  를 생성하기 위한 흡기다기관관의 압력  $P_{m,des}$  를 구하고 이상기체 상태방정식을 이용하여 흡기다기관관의 공기 질량  $m_{a,des}$  를 구한다.

$$\begin{aligned} P_{m,des} &= P_m(\omega_e, T_{net,des}) \quad [\text{engine map}] \quad (15) \\ m_{a,des} &= \frac{P_{m,des} V_m M_{air}}{R T_m} \end{aligned}$$

여기서  $V_m$  은 흡기다기관관의 체적,  $R$  은 이상기체 상수(ideal gas constant),  $T_m$  은 흡기다기관관의 온도,  $M_{air}$  은 공기의 몰당 질량이다. 두 번째 슬라이딩 면을 흡기다기관관으로 유입될 요구 공기 질량  $m_{a,des}$  와 현재 흡기다기관관의 공기 질량  $m_a$  와의 오차로 구성하고 식(2)를 이용하여  $\dot{m}_a$  을 대입한다.

$$S_2 = m_a - m_{a,des} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= \dot{m}_a - \dot{m}_{a,des} \\ &= \dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao} - \dot{m}_{a,des} = -\eta_2 F_s(S_2) \quad (17) \\ \eta_2 > 0, F(S_2) &= S_2 \end{aligned}$$

여기서  $\eta_2$  는 설계 파라미터이다. 따라서 식 (17)로부터 스로틀을 통과해야하는 요구 공기 유량  $\dot{m}_{ai,des}$  를 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_{ai} = \dot{m}_{ao} + \dot{m}_{a,des} - \eta_2 F_s(S_2) \quad (18)$$

이때  $\dot{m}_{ao}$  은 엔진맵으로부터,  $\dot{m}_{a,des}$  는 차분형태로 구한다.

$$\begin{cases} \dot{m}_{ao} = \dot{m}_{ao}(\omega_e, P_m) \\ \dot{m}_{a,des|k} = \frac{m_{a,des|k} - m_{a,des|k-1}}{\Delta t_{ctrl}} \end{cases} \quad (19)$$

여기서  $\Delta t_{ctrl}$  은 샘플링 시간이다.  $\dot{m}_{ai}$  가 구해지면 식(2)로부터 스로틀 밸브 구동기로 입력될 요구 개도량  $\alpha_{cmd}$  을 결정한다.

$$\alpha_{cmd} = TC^{-1}\left(\frac{\dot{m}_{ai,des}}{MAX \cdot PRI}\right) \quad (20)$$

이와 같은 방법에 의해 계산된 스로틀 개도량  $\alpha_{cmd}$  는 스로틀 구동기로 입력, 스로틀을 개폐하여 차속을 변화시키게 된다.

### 5.3 브레이크 구동과 연관된 슬라이딩 면

선행차량과의 간격이 너무 좁아지는 경우와 같이 감속이 필요할 경우  $\omega_{e,des}$  로부터 감속에 필요한 요구 브레이크 토크를 식(3)으로부터 다음과 같이 구한다.

$$T_{b,des} = -\frac{J_{eq} \dot{\omega}_{e,des}}{R_d R_d} - T_r - C_d h_f^3 (R_g R_d)^2 \omega_e^2 \quad (21)$$

세 번째 슬라이딩 면은 식(21)로부터 계산된  $T_{b,des}$  와  $T_b$  의 오차로 설정된다.

$$S_3 = T_b - T_{b,des} \quad (22)$$

$$\dot{S}_3 = \dot{T}_b - \dot{T}_{b,des} = -\eta_3 F_s(S_3) \quad (23)$$

$\eta_3 > 0, F(S_3) = S_3$

식(23)과 (5)로부터 제어입력은 다음과 같다.

$$\dot{T}_b = \dot{T}_{b,des} - \eta_3 F_s(S_3) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} T_{b,c} &= T_b + \tau_b \dot{T}_b \\ &= T_b + \tau_b (\dot{T}_{b,des} - \eta_3 F_s(S_3)) \end{aligned} \quad (25)$$

### 5.4 선택 알고리즘 (switching algorithm)

첫 번째 면으로부터 구해진 요구 가속도를 얻기 위해 차량에 주어지는 두 가지 입력, 즉 스로틀 개도와 브레이크 토크는 일반적으로 차량에 동시에 작동되지 않으므로 적절한 선택 알고리즘 (switching algorithm)을 통해 구동기로 입력시킬 필요가 있다.

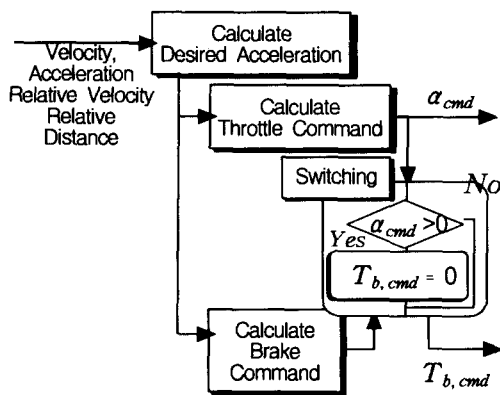


Fig. 3 Structure of Switching Law

본 논문에서는 간단한 경계 (boundary)를 설정하여서도 충분히 양호한 성능을 얻을 수 있어  $\alpha_{cmd}$  값에 경계를 설정하여 결정하였다. 즉,  $\alpha_{cmd}$  가 0 이하로 되었을 경우에는 세 번째 면의 계산 결과인  $T_{b,c}$ 를 입력시켜 브레이크가 작동

되도록 하고  $\alpha_{cmd}$ 가 0 보다 클 경우에는  $T_{b,c}$ 를 0으로 만든다. 이를 도시하면 Fig. 3과 같다.

### 5.5 하향변속제어기 (shift down control)

차량 간격 제어기가 차량을 제어하기 위해 사용하는 일반적인 제어 입력은 앞서 유도된 제어기에서 보는 바와 같이 스톱과 각과 브레이크 토크가 사용된다. 그러나 급격하게 가속 또는 감속하고 있는 선행차량을 추종할 때 추종 차량이 선행차량을 추종하지 못하고 차량 간격이 빠르게 증가 또는 감소하는 경우가 발생하게 된다. 이와 같은 현상이 지속되면, 차량 추종 성능이 감소되고 승차감을 해치는 직접적인 원인이 된다. 하향 변속 제어는 이와 같은 상황에서 추종 성능을 향상시키기 위해 자동변속기에서 발생하는 '킵다운' 현상을 임의로 발생시켜 구동토크를 증가시키거나 엔진 브레이크 현상을 발생시켜 좋은 제어 결과를 얻을 수 있도록 하기 위해 고안되었다.

앞서도 언급한 바와 같이 하향 변속 제어는 선행 차량에 대한 추종이 정상적인 상황에서는 작동하지 않고 다음과 같은 상황에서만 제어가 발생한다.

#### ① 차량 구동력의 부족

요구 구동력이 차량의 성능 범위를 넘어설 경우로 다음과 같은 경우에 발생한다.

▶ 제어기에 사용된 각종 파라미터들이 대상 차량의 파라미터와 너무 차이가 커서 제어기에서 계산된 제어 입력이 선행차량을 추종하기에 불충분한 경우

▶ 차량에 장착된 엔진의 성능이 요구 가속도를 생성하기에 충분하지 못한 경우

두 경우 모두 구동 토크의 부족으로 인해 차량 간의 오차가 커지게 된다. 이 경우 기어비를 낮추면 구동 토크가 증가하여 부족한 차량의 구동력을 증가시키게 된다. 이러한 하향 변속 제어기는 계산값  $T_{net, des}$ 가 설정된 엔진의 최대 정미 토크보다 클 때 발생하도록 하였다.

#### ② 브레이크 작동시

브레이크가 작동을 시작하면 토크의 과부족에 상관없이 강제적으로 하향 변속을 시켜 엔진 브레이크 효과를 유발시키도록 하였다. 따라서 엔진 브레이크로 인해 차속이 빠르게 감소하여 브레이크의 효율을 증가시키게 된다.

### 6. 시뮬레이션 결과

본 논문의 시뮬레이션에서 제어 대상이 된 차량모델은 제어기 설계에 사용된 모델에 공회전 제어밸브, TCU, 구동축의 비틀림, 바퀴의 미끄러짐 등이 추가적으로 고려된 8 자유도의 차량 모델이다. 제어기에 적용된 제어 파라미터는  $\eta_1 = 1$ ,  $\eta_2 = 7$ ,  $\eta_3 = 30$ 이고, 각 면에 적용된 슬라이딩 함수  $F_s$ 는 포화(saturation)함수를 이용하였다. 이러한 제어 파라미터는 여러 번의 시뮬레이션에서 상대적으로 양호한 제어 결과를 얻었을 때의 값이다.

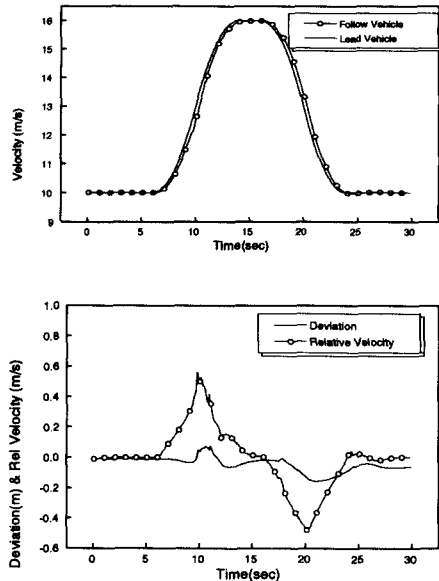


Fig. 4 Simulation Result (I)

Fig.4와 Fig.5는 설계된 제어기를 이용하여 시

물레이션을 수행한 결과를 나타낸다. Fig.4는 선행차량의 속도 변화에 따른 추종차량의 속도, 오차(일탈거리, 상대속도)의 변화를 나타낸다. 이때 선행차량은 가속도가  $1.5 \text{ m/s}^2$ 에서  $-1.5 \text{ m/s}^2$  사이를 선형적으로 변하는 형태를 가지고 진행한 것으로 가정하였다. 이 결과에서 추종차량이 선행차량의 속도를 오버슈트 없이 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있고, 위 결과에서 가속의 경우보다 감속할 때 더 좋은 성능을 내고 있는데 이것은 제어기 설계에 사용된 브레이크 모델과 시뮬레이션에서 사용된 차량의 브레이크 모델이 동일하기 때문에 제어 성능이 우수한 것으로 보인다.

위에서 수행된 시뮬레이션에 사용된 제어기는 하향 변속 제어기가 기본적으로 장착된 것이다.

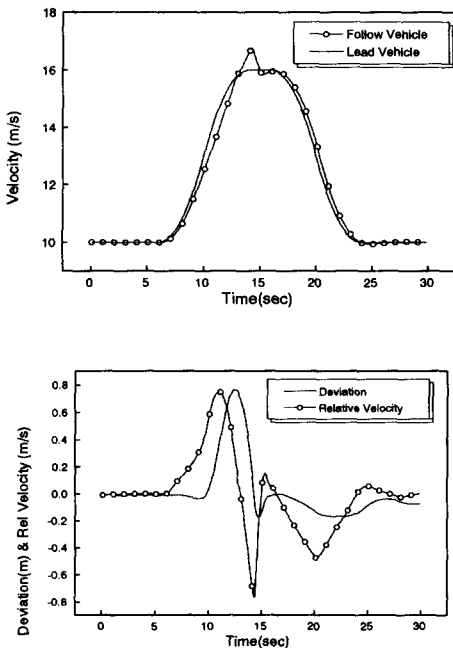


Fig. 5 Simulation Result without Shift Down Control

Fig.5는 하향 변속 제어가 제어 성능에 미치는 영향을 보기 위해 하향 변속 제어를 사용하지 않은 제어기를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 보

았다. 하향 변속제어를 사용한 결과에 비해 오버슈트가 상당히 크고, 오차도 상당히 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig.6에서는 하향 변속 제어기를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 제어 결과를 비교한 것으로 하향 변속 제어기를 장착한 차량이 상당히 우수한 제어 결과를 얻는 것을 확인할 수 있다.

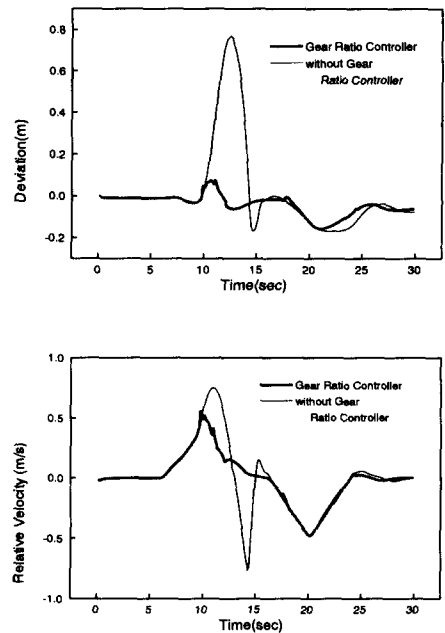


Fig. 6 Comparison of Controller Performance with Shift Down Control

## 7. 차량열(vehicle string)의 주행

ACC 시스템이 장착된 차량을 차량열(vehicle string)모드로 주행시킬 때 차량 추종 오차 증폭 현상(slinky effect)은 가장 관심이 되는 문제 중의 하나이다. 추종 오차 증폭 현상이란 몇 대의 차량이 도로를 주행하고 있을 때, 선두 차량의 속도 변화에 따라 추종 차량의 추종오차가 갈수록 증폭되는 현상으로 차량열 전체를 하나의 제어 대상으로 간주했을 때 전체적인 안정성을 잃어버리는 현상이다.

### 7.1 추종오차 증폭현상(Slinky effect)

추종오차 증폭현상이 발생하는 원인은 선행차량의 급격한 속도 변화이다. 즉, 선행차량이 급격하게 가감속을 일으키게 되면 추종차량이 선행차량의 속도를 추종하지 못하고 큰 속도 오차를 일으키며 불안하게 추종하게 된다. 일단 한 차량에서 큰 속도 오차가 발생되면 이 오차가 발생한 차량 뒤의 모든 차량은 앞의 차량 보다 큰 속도 오차를 가지며 결국 차량열 전체가 불안하게 된다. Fig.7은 본 논문에서 많이 사용된 선행차량의 속도 프로파일을 가지고 차량열 주행을 구성한 결과이다.

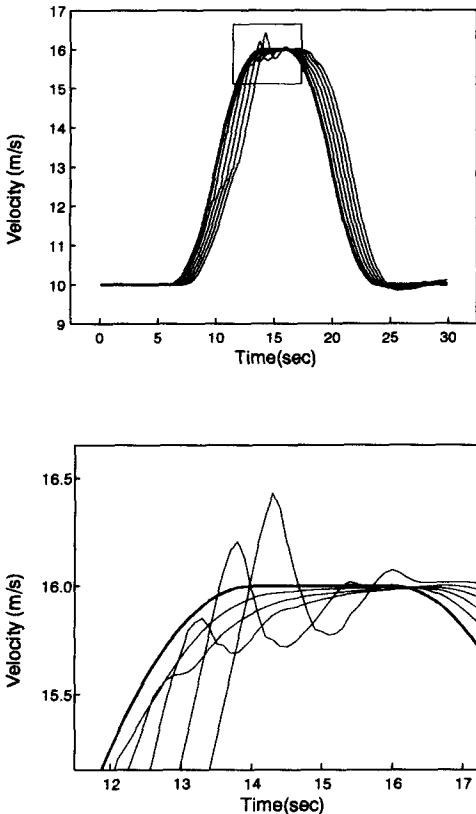


Fig. 7 Slinky Effect of Vehicle String

확대된 그림에서 보는 것과 같이 첫 번째 추종

차량은 선두차량을 잘 추종하고 있으나 두 번째 추종차량은 선행차량인 첫째 추종차량의 속도 변화에 영향을 받아 12.5초 근방에서 급격한 속도 변화를 하고 있고, 세 번째 추종 차량부터는 오버슈트가 발생하여 각 차량의 선행차량보다 큰 오버슈트를 가지고 추종하고 있다.

### 7.2 예측 보정 방법(Predictive Correction Method ; PCM)

추종오차 증폭현상을 ACC 시스템에서 막는 것은 근본적으로 불가능하다. 왜냐하면 오버슈트를 막기 위해서는 선행차량보다 앞선 차량의 정보, 대표적으로 차량열의 선두차량의 가속도를 알아야 미리 속도를 줄여 오버슈트를 줄일 수 있기 때문이다. 그러나 선두 차량의 가속도를 알기 위해서는 차량간 통신이 필요하게 되고 이것은 ACC의 개념에 맞지 않게 된다. 따라서 ACC제어기는 현재 획득된 정보를 바탕으로 최대한 추종 오차 증폭현상을 감소시키는 방법을 찾아야 한다.

본 논문에서는 추종오차 증폭현상을 억제하기 위해 일종의 예측제어(predictive control)기법을 도입하였다. 본 논문에서 사용하는 예측 보정 방법(PCM)은 간단한 예측제어의 형태를 가진다. 예측되는 상태량은 상태속도와 일탈거리이고 예측된 값들을 이용하여  $\dot{v}_{f,des}$ 를 조정한다. 예측기(predictor)의 형태는 이산 시간하에서  $N$ 스텝 후의 상태를 다음과 같이 예측한다.

$$\hat{v}_{r,k+N} = v_{r,k} + N \cdot (v_{r,k} - v_{r,k-1}) \tag{26}$$

$$\hat{\delta}_{k+N} = \delta_k + N \cdot (\delta_k - \delta_{k-1})$$

따라서  $N$  스텝 후의 이상적인 가속도는 식 (12)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{v}_{f,des,k+N} = \frac{\hat{v}_{r,k+N} + \eta_1 F_s (\hat{\delta}_{k+N})}{h} \tag{27}$$

현재 오차값으로 계산된 이상적인 가속도가



$\tilde{v}_{f,des}$  라면 입력되는 이상적인 가속도는 다음과 같이 보정된다.

$$\dot{v}_{f,des} = w \tilde{v}_{f,des} + (1-w) \hat{v}_{f,des,k+N} \quad (28)$$

이 때  $w$ 는 가중치로  $w$ 가 크면 이상적인 가속도에 현재 값의 영향이 크고  $w$ 가 작으면 미래 값에 대한 영향이 커진다. 본 논문에서는  $w$ 를 0.5로 선택하여 현재 상태량과 예측 상태량의 반영 비율을 동일하게 설정하였고  $N$ 을 2로 설정하여 2스텝 후의 상태량을 예측하였다.

Fig.8, Fig.9는 차량 20대로 차량열을 구성하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 결과에서 보듯이 PCM을 적용한 제어가 전체적인 차량열의 안정에서 월등히 우수한 것을 볼 수 있다.

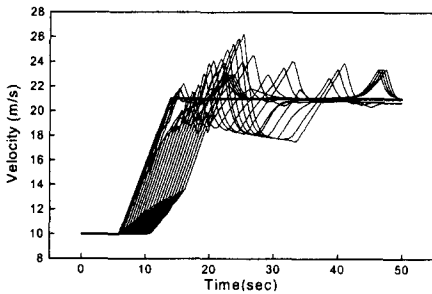


Fig. 8 Vehicle String composed of 20 Vehicles without PCM

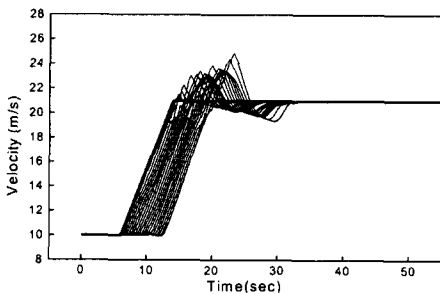


Fig. 9 Vehicle String composed of 20 Vehicles with PCM

그러나 현재 사용된 PCM은 현재와 이전 값을 가지고 2 스텝 후의 값을 예측하는 것으로 센서의 노이즈(noise)가 심한 시스템이거나 오차에 대하여 제어 출력의 변화가 민감한 제어기일 경우 제어 성능이 불안해질 수가 있다. 이러한 현상은 2 스텝 이상을 예측할 경우에도 발생하였다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 제어기로 입력되는 오차의 노이즈를 줄일 수 있는 필터의 설계와 보다 정교한 예측기의 설계에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 파워트레인 모델을 기반으로 비선형 제어 기법인 슬라이딩 모드 제어 이론을 이용하여 ACC 제어기를 설계하고 이를 이용한 시뮬레이션을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 또한 두 가지의 추가적인 제어 기법을 적용하여 설계된 제어기를 보완하였다.

- 1) 보다 광범위하고 정교한 제어가 가능하도록 간략화 된 차량 모델과 슬라이딩 모드 제어 이론을 적용하여 차량 간격 자동제어(ACC)에 적용될 제어기를 설계하여 그 성능이 우수함을 확인하였다.
- 2) 상용 TCU를 사용하고 있는 차량에 쉽게 적용 가능한 하향 변속 제어기를 설계하였다. 시뮬레이션 결과에서 하향 변속 제어기를 장착한 제어기는 하향 변속 제어기를 장착하지 않은 제어기보다 우수한 제어성능을 보이고 있다.
- 3) ACC 제어기를 장착한 차량이 차량열을 구성하여 주행하게 될 때 발생하는 현상인 추종 오차 증폭 현상을 감소시키기 위해서 간단한 예측제어 기법인 예측보정방법(predictive correction method; PCM)을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 PCM을 이용할 경우 차량열 모드 제어가 상당히 안정화 되는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) S. E. Shladover, "Longitudinal Control of Automated Guideway Transit Vehicles Within Platoons", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 100, Dec. 1978.
- 2) D. H. McMahon, J. K. Hedrick and S. E. Shladover, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems", ACC, 1990.
- 3) 최재성, 장광수, "퍼지 적응제어를 이용한 차량 간격 제어 알고리즘에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 4, Nov. pp175-186, 1996.
- 4) C. C. Chien, P. Ioannou and M. C. Lai, "Entrainment and Vehicle Following Controllers Design for Autonomous Intelligent Vehicles", ACC, pp 6-10, 1994.
- 5) Dong-II Cho , "Nonlinear Control Methods Automotive Powertrain Systems", M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- 6) Jean-Jacques E.Slotine and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991.