한국자동차공학회논문집 제 10 권 제 6 호, pp.227-233

String Stability를 보장하는 정지/서행 순항제어 시스템

A Stop-and-Go Cruise Control Strategy with Guaranteed String Stability

박 요 한*, 이 경 수**
Yohan Park, Kyongsu Yi

ABSTRACT

A vehicle longitudinal control strategy with guaranteed string stability for vehicle stop-and-go(SG) cruise control is presented in this paper. The SG cruise control systems should be designed such that string stability can be guaranteed in addition to that every vehicle in a string of SG cruise control vehicles must track any bounded acceleration and velocity profile of its preceding vehicle with a bounded spacing and velocity error. An optimal vehicle following control law based on the information of the following distance (clearance) and its velocity relative to the vehicle ahead (relative velocity) has been used and string stability analysis has been done based on the control law and constant time gap spacing policy. A validated multi-vehicle simulation package has been shown that the string stability analysis using the approximate model of the vehicle servo-loop which includes vehicle powertrain and brake control system dynamics is valid in the design of the SG cruise control law with guaranteed string stability.

주요기술용어 : Intelligent cruise control(지능형 순항 제어), Stop and go cruise control(정지/서행 순항제어), Multi-vehicle(다차량), String stability, Time gap

Nomenclature

a : vehicle's acceleration, m/s^2
v : vehicle's velocity, m/s
C : clearance, m
x : vehicle's absolute position, m

Subscripts

I : i-th hehicle
d : desired
G : guaranteed
r : relative

* 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과
** 회원, 한양대학교 기계공학부

1. 서 론

지능형 순항 제어(Intelligent Cruise Control, ICC) 시스템과 정지/서행 순항 제어(Stop and Go Cruise Control, SG) 시스템의 운전자 보조 시스템(Driver Assistant System)은 대부분의 자동차 제조회사에서 현재 개발 연구중이며 그 중 몇개의 회사에서 생산이 되고 있다. Fig. 1과 같이 정지/서행 제어 차량이 여러 대일경우 선행차량과 제어되는 정지/서행 차량의 두 대의 차량에서 예상하지 못한 거리오차로 인해 그 거리오차가 다음 차량에 전파되면서 상대거리가 줄어들어 결국

충돌하게 되는 상황이 일어난다. 따라서, String Stability를 보장하는 제어기법이 필요하게 된다. String Stability는 1966년(Levin)[1]에 의해 소개되었고 1977년(Caudill and Garrard)[2]에 그 연구가 본격적으로 시작되었다. 1996년에 이르러 String Stability는 수학적으로 정의되어졌다.[3,4] 이후로 최적적응지능제어(Optimal Adaptive Cruise Control),[5] Lyaponouv Fuction[6] 등을 이용한 제어기법들이 연구되어 왔다.[7] 또한 String Stability에서 중요한 요소인 Time Gap을 이용한 차간거리제어 기법들에 대한 연구들이 진행되고 있다.[8] 이러한 연구에서의 상대거리 제어에는 일정거리제어(Constant Spacing Control), 일정 시간 간격 제어(Constant Time Gap Control), 가변 시간 간격 제어(Variable Time Gap Control)등이 있다. 본 연구는 Time Gap 이 String Stability에 미치는 영향 및 적절한 Time Gap 설정에 대한 연구를 기술하고 있다. 또한, 정지/서행순항제어 차량과 흡사한 특성을 보이는 Matlab Simulation Model을 통해 검증하여 Time Gap제어로 String Stability를 보장할 수 있음을 입증하였다.[8-11]

2. String Stability

Fig. 1은 정지/서행 순항 제어 차량들이 도로 위에서 한 줄로 진행하고 있는 경우를 나타내고 있다. 각 차량에서 선행 차량과의 거리오차비율이 1이하가 되면 String Stability를 만족한다라고 말할 수 있다. 다시 말해 차간 거리의 거리오차가 차츰 감소하여 목표거리에 수렴하게 된다는 것이다.

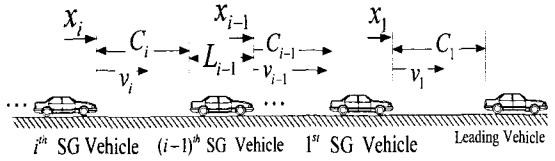


Fig. 1 Schematic vehicles in the string

여기서 x_i 는 i번째 차량의 거리, v 는 i번째 차량의 속도, C_i는 i 번째 차량의 상대거리 $(x_{i-1}-x_i)$ 이다.

2. 1 String Stability 정의

각 차량에서 선행 차량과의 거리오차비율이 1 이하를 만족하는 식 (1)을 만족하면 String Stability를 보장한다. 그리고 모든 상대거리는 최소보장거리 보다 커야 한다. 식 (1)을 이용하여 String Stability 를 정의할 수 있다.

$$\left|\frac{E_i(j\omega)}{E_{i-1}(j\omega)}\right| \le 1,\ \forall C_i \ge C_G \tag{1}$$

여러 대의 차량이 늘어선 지능화 차량중에 i 번째 차량의 거리오차는 식 (2)와 같이 나타나게 되며 목표거리는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$e_i = C_{i,d} - C_i \tag{2}$$

$$C_{i,d} = \tau v_i + C_G \tag{3}$$

여기서 τ 는 시간간격(Time Gap)이며, C_G 는 선행차량의 정지시 유지해야 하는 최소거리(2m)이다.

2. 2 차량모델에 따른 Time Gap

2. 2. 1 이상적인 모델(Ideal Model)

이상적인 차량(Ideal Vehicle)은 식 (4)와 같이 목표가속도가 제어되는 차량의 가속도와 같은 차량이다.

$$u_i = \ddot{x}_i = -k_1(C_{i,d} - C_i) - k_2 v_{i,r} \tag{4}$$

여기서, u_i는 목표가속도, $C_{i,d}$ - C_i는 목표거리, $v_{i,r}$는 제어되는 차량의 상대속도를 각각 나타낸다. τ 는 Time Gap, C_G는 선행차량의 정지시 유지해야 하는 최소거리이다. 식 (4)를 i번째 차량과 $(i-1)$번째 차량에 적용하면,

$$\ddot{x}_{i-1} = -k_1(\tau \cdot \dot{x}_{i-1} - (x_{i-2} - x_{i-1}) + C_G) - k_2 \cdot (\dot{x}_{i-2} - \dot{x}_{i-1}) \tag{5}$$

$$\ddot{x}_i = -k_1(\tau \cdot \dot{x}_i - (x_{i-1} - x_i) + C_G) - k_2 \cdot (\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)을 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\ddot{C}_i = -k_1\tau\dot{C}_i + k_1(C_{i-1} - C_i) - k_2(\dot{C}_{i-1} - \dot{C}_i) \quad (7)$$

식 (2)를 식 (7)에 대입한 후 Laplace 변환을 하면 다음과 같다.

$$E_i(s) = \left(\frac{-k_2 s + k_1}{(1+k_2\tau)s^2 - k_2 s + k_1}\right)E_{i-1}(s) + \left(\frac{k_2\tau^2 + \tau}{(1+k_2\tau)s^2 - k_2 s + k_1}\right)\ddot{x}_i(s) \quad (8)$$

여기서 우선 거리에러에 대한 식 (1)과 같이 하면 식 (9)와 같다.

$$\left|\frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)}\right| = \left|\frac{-k_2 s + k_1}{(1+k_2\tau)s^2 - k_2 s + k_1}\right| \le 1 \quad (9)$$

식 (9)를 주기함수로 변환 후 정리하여 다음과 같은 조건을 만족하면 에러는 항상 감소한다.

$$\tau \ge -\frac{1}{k_2} \; (if \; k_2 < 0) \quad (10)$$

식 (10)으로부터 속도오차이득인 K_2가 클수록 Time Gap은 작아지게 됨을 알 수 있다.

2.2.2 근사화 모델(Approximated Model)

저속영역에서는 차의 중량과 브레이크의 특성 등 여러 요소에 의해 급감가속시 목표감가속도를 추종하는 응답이 느리게 된다. 목표가속도로부터 제어차량의 가속도의 응답은 식 (11)과 같이 1차 함수로 근사화였다.

$$a_i = \frac{1}{qs+1}u_i \quad (11)$$

식 (11)을 이상적인 모델과 같은 계산 과정을 통하여 결론을 얻으면 다음과 같이 나온다.

$$E_i(s) = H_1(s)E_{i-1}(s) + H_2(s)\ddot{x}_i(s) \quad (12)$$

여기서,

$$H_1(s) = \frac{-k_2 s + k_1}{qs^3 + (1+k_2\tau)s^2 - k_2 s + k_1}$$

$$H_2(s) = \frac{\tau \cdot qs^2 + (k_2\tau + 1)\tau s}{qs^3 + (1+k_2\tau)s^2 - k_2 s + k_1}$$

$E_i(s)$와 $E_{i-1}(s)$의 전달함수 $H_1(s)$는 에러를 전파하는 전달함수이고 $H_2(s)$는 자차의 가속도로부터 얻어지는 에러 전달함수이다. 만약, $|H_1(j\omega)| \le 1$를 만족하고 $|H_2(j\omega)|$가 차량의 주행시에 충분히 작은 범위이면 이 시스템은 String Stability 를 만족한다. 따라서 조건들을 만족하기 위해 파라미터를 조정하여야 한다. 즉, 최적제어로부터 구한 이득인 k_1, k_2 와 Time Gap인 τ 등을 적절하게 설계하여야 한다. Fig. 3은 설계된 각각의 제어이득, 등가시정수, 및 Time Gap에 대해 Bode선도를 나타내었다. $|H_2(j\omega)|$가 작은 주기의 범위에서 충분히 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같이 $|H_2(j\omega)|$가 충분히 작을 때, String Stability를 만족하는 조건은 다음 식 (13)과 같다.

$$|H_1(j\omega)| \le 1, \; \forall\omega \quad (13)$$

차량의 파워트레인과 브레이크 시스템에 따른 등가시상수인 q가 주어지면 String Stability를 만족하기 위한 제어이득 k_1, k_2가 구해지고 최종적으로 충분한 Time Gap이 필요로 하게 된다. 다시 말해 식 (12)로부터 식 (13)에 대해서 구하여 식을 Time Gap과 등가시상수의 함수로 정리하면 다음과 같은 식으로 정리된다.(여기서 $k_1>0$, $k_2<0$ 이다.)

$$q < \frac{1}{2}\frac{(1+k_2\tau)^2\left(-k_2 - \sqrt{k_1(-k_2\tau - 1)}\right)}{k_1 k_2\tau + k_1 + k_2^2} \quad (14)$$

2.2.3 차량 모델

차량에 유사한 거동을 하는 ICC차량모델은 Fig. 4와 같이 비선형모델로 나타낼 수 있다. 차속의 상태 방정식은 다음과 같고, Fig. 4에서 F_{trr}와 F_{trf}는 구동륜과 피동륜의 구동력이고 F_a는 공기저항력, θ는 도로 경사각도, M_v는 차량의 총무게, M_r은 구름저항이다. F_L은 주행부하로써 경사부하는 무시하고 , 공기부하, 그리고 구름저항에 대한 부하를 모두 포함하는 값으로 한다.

$$M_v\dot{v} = F_{trf} + F_{trr} - F_L \quad (15)$$

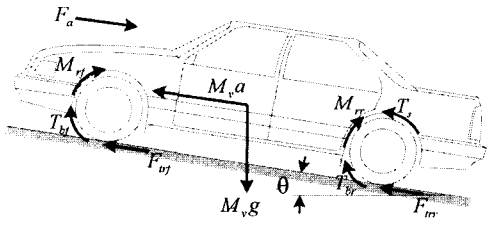


Fig. 2 SG Vehicle model

구동륜과 피동륜 휠의 각속도 상태 방정식은 식 (16)과 같고,

$$J_{wr}\dot{\omega}_{wr} = T_s - r_r F_{trr} - T_{br}$$
$$J_{wf}\dot{\omega}_{wf} = -r_f F_{trf} - T_{bf} \quad (16)$$

r_f, r_r는 전륜/후륜의 반지름, J_{wr}와 J_{wf}는 각각의 휠의 관성 모멘트, T_{br}, T_{bf}는 각각 바퀴의 제동력을 나타낸다. 또한 브레이크 모델은 전자제어 부스터(EVB)를 모델링하였는데, 목표감속도에 따른 목표차압을 브레이크 컨트롤러에서 PWM 신호로 내보내고 이 신호의 듀티율에 따라 EVB에 차압이 형성된다. EVB에서 형성된 차압이 마스터실린더를 걸쳐 바퀴에 전달되어져 제동력이 발생하게 된다. 또한 쓰로틀 액츄에이터는 가속시에 모터를 통해 쓰로틀 밸브를 제어하도록 하였다.

2.3 차간 거리 제어 알고리듬

차간 거리 제어시에 선행 차량이 없는 경우에 보통 속도제어를 하지만 선행 차량이 존재할 때, 차량과 차량사이의 상대거리가 너무 크지 않다면 거리제어를 하게 된다. 또한 차량의 목표가속도에 대해 쓰로틀/브레이크 제어기법으로 이루어졌다. Fig. 4와 같은 알고리듬을 갖게 된다.

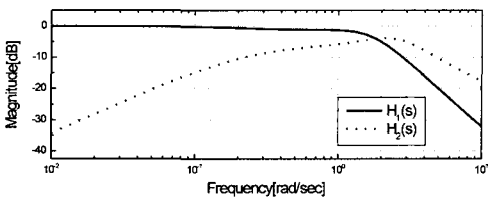


Fig. 3 Bode plot of the transfer function $H_1(s)$ and $H_2(s)$

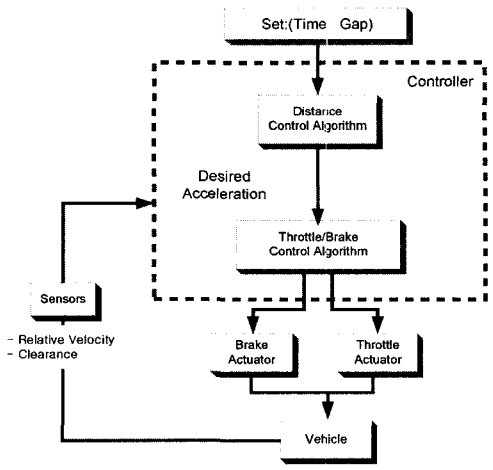


Fig. 4 Schematic of SG system

2.3.1 거리제어

최적의 감가속도를 설정하기 위해 상태변수를 결정하고 상태방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$x_1 = C_{i,d} - C_i, \quad x_2 = v_{i,r} = v_{i-1} - v_i \quad (17)$$

$$u = a_i, \quad w = a_{i-1} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1 \\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & -1 \\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1 \\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\tau \\ -1\end{bmatrix}u + \begin{bmatrix}0 \\ 1\end{bmatrix}w \quad (19)$$

여기서 $C_{i,d}$는 목표거리, C_i은 상대거리, $v_{i,r}$은 상대속도, v_i는 제어되는 차량의 속도, a_i는 제어되는 차량의 감가속도를 나타내다.

다음과 같은 성능 지수(performance index)를 정의할 수 있다.

$$J = \int_0^\infty \left(x^T Q x + u^T R u\right) dt \quad (20)$$

$$Q = \begin{bmatrix}\rho_1 & 0 \\ 0 & \rho_2\end{bmatrix}, \quad R = r \quad (21)$$

여기서 ρ_1, ρ_2, r은 성능과 승차감사이에서 상호보완적으로 선택된다. 본 논문에서 ρ_1= 1, ρ_2= 3, 그리고 r = 9.5 로 사용되었다.

이 성능지수로부터 속도, 거리오차와 내차의 감/가속도를 최소화하도록 최적 게인 k_1, k_2를 구하고 최적의 감가속도를 결정하게 된다.

$$a_i = -\mathbf{K}\mathbf{x}_i = -k_1(C_{i,d} - C_i) - k_2 v_{i,r} \quad (22)$$

3. 시뮬레이션 결과

선행차량을 한 대의 주행제어 차량이 추종하는 경우의 결과를 사용하여 차량 시뮬레이션모델을 검증하였고, 검증된 시뮬레이션모델을 사용하여 다차량(Multi-Vehicle)에 대하여 시뮬레이션하였다. 먼저 2.2.3 절에서 제안한 차량모델의 시뮬레이션과 실험에 쓰이고 있는 차량과의 비교를 통해 제안한 차량모델을 검증하였다. 이것으로부터 제안한 차량모델과 근사화 모델과의 비교를 통해 모델 검증하였다. 근사화모델에서 차량의 목표감가속도에 대한 응답특성과 최적제어의 이득에 따라 Time Gap (τ)이 변화하므로 선행차량이 가장 위험한 급감속도를 보이는 경우로부터 제안된 최소 Time Gap을 설정한다. 제어되는 차량을 여러대 연결하여 즉, 한줄로 늘어선 다차량에서 제안된 Time Gap을 검증하였다.

3.1 모델 검증

3.1.1 실차와 시뮬레이션 결과

저속영역에서 실험용 차량과 시뮬레이션에 사용된 모델을 비교 검증하였다. 초기속도는 0km/h이고 Time Gap은 1.2sec로 하였다. 선행차량의 속도가 10km/h ~ 30km/h 일 경우 실험의 결과와 시뮬레이션의 결과는 Fig .5와 같이 나온다. 실험차량의 결과와 시뮬레이션의 결과를 비교하여 보면 속도와 상대거리의 경향이 아주 잘 일치함을 알 수 있다. 이 시뮬레이션은 다차량 시뮬레이션 모델의 각각의 차량 모델과 일치하는 것이다.

3.1.2 다차량에서의 시뮬레이션 결과

3.1.1에서 보인 모델과 비슷한 응답특성을 가지는 근사화모델를 구하여, 이로부터 String Stability를 보장하는 Time Gap을 구할 수 있다. 최적 제어 이득은 $K_1 = 0.3244$, $K_2 = -0.9822$ 이고 $q = 0.2$면 Fig. 6과 같은 급감속도의 응답특성을 같게 된다.

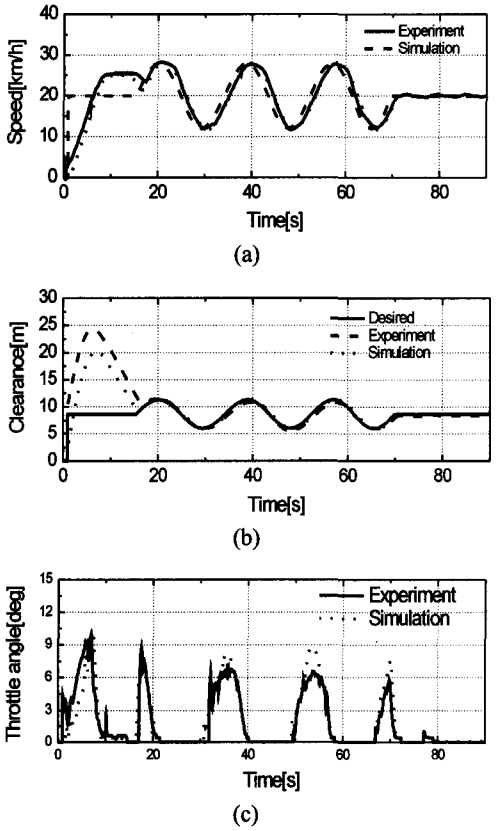


Fig. 5 SG Model validation

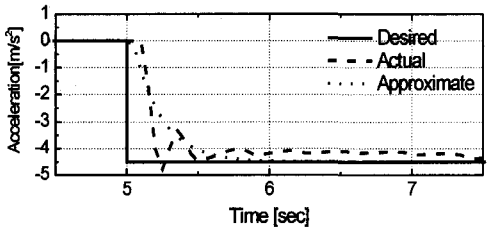
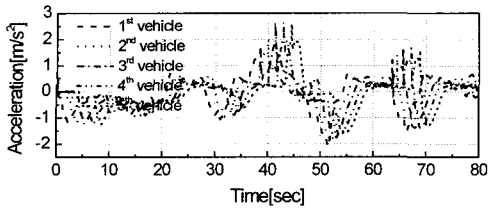
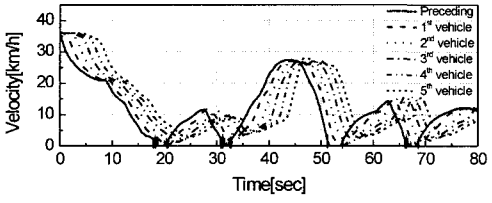


Fig. 6 System response of approximated model

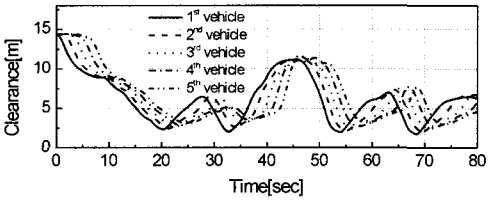
Fig. 6과 같은 응답특성을 가지는 경우 식 (14)을 만족하게 하는 Time Gap을 1.24이상의 값이다. 1.24sec를 SG차량을 제안된 모델에 넣어서 String Stability를 검증하였다. Fig. 7은 선행차량이 저속구간에 거동하는 경우를 시뮬레이션 한 결과이다. 차량이 안전거리인 2m이상을 유지하며 속도나 상대거리가 선행차량과 비교하여볼 때 증가하지 않으므로 String Stability를 만족한다.



(a)



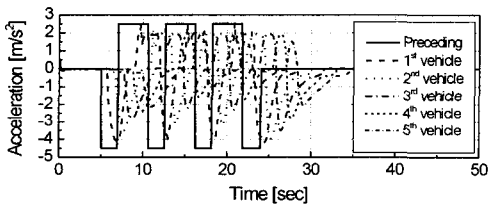
(b)



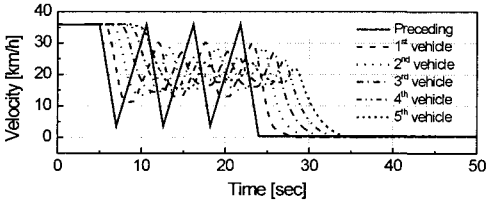
(c)

Fig. 7 Simulation results for low-speed stop-and-go driving situation (time gap = 1.24 seconds)

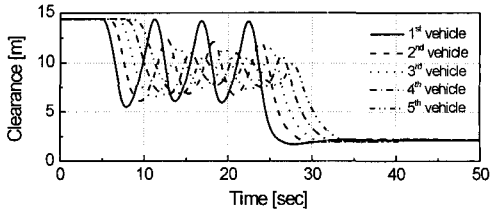
Fig. 8은 등가시상수 (q)가 0.2초이고 최적 제어 이득이 $[k_1, k_2] = [0.3244 - 1.2211]$ 일 경우, Time Gap을 1.24초로 하여 급가감속을 하는 시뮬레이션 한 결과이다. Fig. 8 는 선행 차량이 급감속도 (a)로 주행하는 경우 상대거리(c)가 안전거리를 보장하고 거리오차가 줄어들어 안전하게 된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Simulation results for a string of vehicles (time gap = 1.24 seconds)

4. 결 론

이 논문에서는 여러 대의 정지/서행 제어 차량의 String Stability를 만족하기 위해 근사화 모델로부터 다차량(Multi-Vehicle)에서의 안정성을 보장하도록 하는 Time Gap과 제어이득의 관계를 유도하였다. 실험 결과를 통하여 검증된 다차량(Multi-Vehicle) 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 여러 대의 정지/서행 주행 제어 차량의 주행 제어 성능을 String Stability 관점에서 검토하였다. 현재의 주행 제어 시스템의 경우 Stability를 보장하기 위해서는 최소한 Time Gap이 1.24sec 이상 되어야 한다. 향후 실험 차량을 이용한 실험 연구를 통하여 String Stability를 연구할 것이다.

후 기

한국과학재단(KOSEF) 목적기초연구(R01-2000-000-00301-0)으로 이루어진 것으로써 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) J. Levine, M. Athans, "On the Optimal Error Regulation of a String of Moving Vehicles," IEEE Transactions of Automatic Control, Vol. 11, pp.355-361, 1966.
2) R. J. Caudill, W. L. Garrard, "Vehicle-follower Longitudinal Control for Automated Transit Vehicles," J. of Dynamic Systems, Measument, and Control, pp.241-248, 1977.
3) D. Swaroop, J. K. Hedrick, "String Stability of

Interconnected Systems," IEEE Trans. Automat. Contr.,Vol.41, No.3, pp.349-356, 1996.
4) D. Swaroop, J. K. Hedrick, "Constant Spacing Strategies for Platooning in Automated Highway Systems," Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol.121, pp.462-470, 1999.
5) C. Y. Liang, H. Peng, "Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability," AVEC Conf. Nagoya, Japan, pp.717-722, 1998.
6) T. S. No, K. T. Chong, D. H. Roh, "A Lyapumov Function Approach to Longitudinal Control of Vehicles in a Platoon," IEEE Trans. On Vehicular Technolagy, Vol.50, No.2, pp.116-124, 2001.
7) S. E. Shlodover, "Longitudinal Control of Automated Guideway Transit Vehicles within Platoons," Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, Vol.100, pp.302-310, 1978.
8) D. Yanakiev, I. Kanellakopoulos, "Variable Time Headway for String Stability of Automated Heavy-Duty Vehicles," IEEE Proceedings of the 35th Conf., pp.4077-4081, 1995
9) K. Yi, S. Lee, "Modeling and Control of an Electronic-Vacuum Booster for Vehicle-to-Vehicle Distance Control," AVEC 2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, AVEC #29, 2000.
10) 송재복, "엔진맵에 기초한 엔진제어 TCS 슬립제어 알고리듬의 개발," 대한기계학회논문집, 제22권 제2호, pp.428-436, 1998.
11) 정용복, 송용규, "자동차 지능주행 제어시스템에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제3권 제6호, pp.176-187, 1995.