

<논 문> SAE NO. 96370130

# 퍼지 적응제어를 이용한 차량간격 제어 알고리즘에 관한 연구

## Autonomous Intelligent Cruise Control Using the Adaptive Fuzzy Control

장 광 수,\* 최 재 성\*\*  
K. S. Chang, J. S. Choi

### ABSTRACT

In Advanced Vehicle Control System (AVCS), Autonomous Intelligent Cruise Control (AICC) is generally understood to be a system that can be achieved in the near future without the demanding infrastructure components and technologies. AICC is an automatic vehicle following system with no human engagement in the longitudinal vehicle direction. This paper presents a fuzzy control algorithm to develop the AICC system. The control performance was studied information of vehicles using computer simulations. The most important aspects of the work reported here are the adoption of the fuzzy adaptive control law, and the use of filtering concept to reduce the slinky effects that may appear in a formation of vehicles equipped with AICC systems. The simulation results demonstrate the effectiveness of the fuzzy adaptive AICC system and its beneficial effects on traffic flow.

주요기술용어 : AICC(차량간격 자동제어), AVCS(자동 차량 제어 장치), ITS(첨단 교통 체계), Fuzzy adaptive control(퍼지 적응제어), Vehicle control(차량 제어)

### 1. 서 론

지금까지 차량간격 자동제어 장치(AICC system)의 제어기설계를 위해서 다양한 제어알고리즘이 개발되어 왔다. 엔진부를 포함한 차량주행 모델은 비선형성이 강한 시스템이며, 제어법칙을

유도하기 위해 엔진부의 동적거동을 간단한 1차 원동적시스템으로 가정하고 PID 나 LQ와 같은 선형제어이론을 적용하거나<sup>1)</sup>, 엔진의 비선형성을 고려한 보다 정교한 모델에 근거를 두고 입출력 선형화(I/O linearization)<sup>2)</sup>나 슬라이딩 모드<sup>3)</sup>와 같은 비선형제어알고리즘을 적용하여 제어법칙을 유도하였다. 전자의 경우 선형모델의 오차로 인해 정교한 제어를 기대하기 힘들고 선행 차량의 주행정보를 필요로 하는 경우가 있다<sup>4)</sup>.

\* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

\*\* 홍익대학교 기계공학과 대학원

또한, 후자의 경우 역시 선행차량의 주행정보를 필요로하거나<sup>5)</sup>, 개별차종마다의 정상상태 엔진 데이터를 구축하고 look-up table 방식을 이용해야 한다. 즉, Chien<sup>6)</sup>이나 Mayr<sup>7)</sup>가 제안한 제어 알고리즘은 정상상태의 주행속도와 스로틀 각도에 따른 엔진구동력이 직접 제어법칙에 포함되며, Hedrick<sup>8)</sup>이 제안한 3중 슬라이딩 표면(triple sliding surface)을 이용한 제어법칙의 경우에도 정상상태에서의 엔진 스로틀각, 연료분사량, 정미토크(net torque), 흡기관 압력등의 데이터가 제어신호 계산에 직접 이용된다. 이러한 정상상태의 데이터들은 미리 실험을 하여 제어기 내에 테이블로서 구축되는데, 이러한 데이터들은 차종에 따라 각각 다르며, 또 같은 차종이라 하더라도 엔진의 성능 및 주행환경 등이 변화함에 따라 달라질 수 있기 때문에 제어기의 성능을 영구적으로 보장하기가 어려우며 제어기개발에 있어서 시간과 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라, 차량간격 자동 제어장치(AICC system)의 범용 개발이 어려워진다. 본 논문에서는 퍼지논리를 이용한 차량간격 자동제어장치를 설계하고 이것의 제어특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석, 검증하였다. 퍼지논리를 이용한 제어알고리즘을 제안하는 이유는 첫째로, 제어대상이 강한 비선형특성을 갖는 복잡한 시스템이며 제어법칙 유도를 위한 정교한 수학적인 모델을 구축하기가 어려운 반면, 퍼지제어는 차량의 모델을 근거로 하지 않고 운전자의 언어적인 지식을 근거로 하기 때문에 소프트웨어적인 구현이 비교적 쉽고 빠르면서도 좋은 성능을 보여준다<sup>9)</sup>. 둘째로는, 지금까지 차량간격 자동 제어장치를 위해 개발된 많은 제어알고리즘이 선행차량의 가속도 정보를 필요로 하는 반면, 퍼지제어는 선행차량과의 통신없이 독자적인 제어가 가능하기 때문이다. 그러나, 일반적으로 퍼지제어는 적용성이 없는 것으로 알려져 있다. 이것은 퍼지제어가 갖는 결정적인 단점이다. 즉, 제어기설계에 있어서 그 제어 출력응답특성을 미리 검증하기가 어렵고 따라서 여러번의 시행착오에 의해 최적의 퍼지룰과 멤버십함수를 결정하게 되는데, 만일 시스템의 동적인 특성이 변화되는 경우에 -예를들어 엔

진 및 브레이크의 동적성능이 변한다든지 혹은 차량의 중량변화나 바람, 주행경사각의 영향등을 받는 경우- 제어기의 강인한 응답성능을 보장할 수가 없다. 또한 퍼지추론에 의한 제어가 제어대상의 수학적인 모델에 근거하지 않는다는 사실이 갖는 단점으로는 제어성능의 안정성을 정량적으로 증명할 수가 없을 뿐 아니라 특히 AICC에서 중요한 현안중의 하나인 '추종 오차 증폭현상(slinky effect 현상)<sup>3)</sup>'을 방지할 수가 없다는 것이다. 본 논문에서는 진술한 퍼지제어가 갖는 단점을 보완하고 이를 이론적으로 검증할 수 있는 퍼지 적응 제어알고리즘(Fuzzy Adaptive Control Algorithm)을 제안하였다. 즉, 비선형 시스템 제어의 대표적 알고리즘인 입출력 선형화 알고리즘과 리아프노프안정성 이론을 퍼지시스템에 이용하여 퍼지추론엔진의 파라미터를 조율하는 법칙을 구축하여 차량추종에 있어서의 안정성과 slinky effect현상의 방지를 보장할 수 있으며, 차량의 성능변화나 차종의 변화에 강인하여 모든 차량에 범용적으로 적용할 수 있는 적응제어 알고리즘을 확립하였다.

선행차량과의 통신없이 독자적인 제어를 하는 경우에 있어서의 단점으로는, 주행조건을 AICC 모드 전환 순간의 초기조건에 따라, 또는 선행차량의 지나친 급가속시에, 추종차량의 무리한 토크를 생성할 뿐 아니라 승차감에 나쁜 영향을 줄 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 현상을 방지하기 위해서 선행차량과의 상대거리와 상대속도신호를 지연시키는 필터를 설계하여 문제를 해결하였고 시뮬레이션을 통하여 이 필터의 영향을 검증하였다.

## 2. 제어 알고리즘

### 2.1 퍼지 제어시스템

#### 2.1.1 제어시스템구성

차량주행 개념도를 Fig.1에서, 퍼지제어기의 구성요소를 Fig.2에서 보여주고 있다. 센서에서 취득한 데이터는 선행차량과의 상대거리 및 상대속도이며 제어기는 이 두 정보외에 차속 및 가속

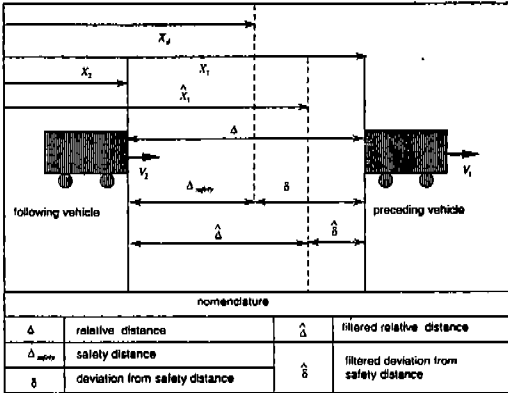


Fig.1 Variables definition in vehicle-following maneuver

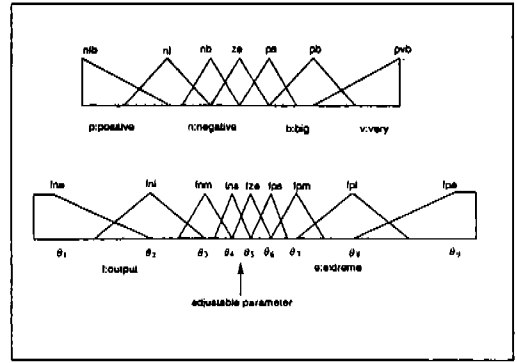


Fig.3 Membership function

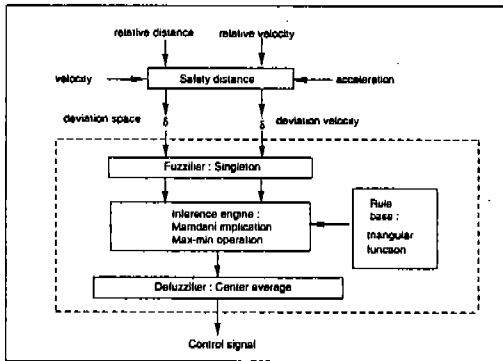


Fig.2 Structure of the fuzzy controller

정보등을 바탕으로 안전거리를 계산한다. 안전거리는 Ioannou가 제안한 차량간격방침(Time Headway Policy)<sup>3)</sup>을 근거로 계산한다. 이에 따르면 선행차량과의 안전거리는 추종차량의 속도에 비례하도록 하는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_{safety} = t_h v_{follow} + d_h \quad (1)$$

여기서  $t_h$ 는 차량 간격 시간(time headway)으로 차간 거리를 후속차량 속도를 기준으로 한 시간으로 표현한 파라미터이고,  $d_h$ 는 선행차량과 이루어야할 최소의 거리를 나타낸다. 제어는 선

행차량과의 상대거리를 안전거리에 수렴하도록 수행되며, 여기서 제어오차는 안전거리로부터 일탈거리가 된다. 퍼지제어기로 입력되는 변수는 제어오차와 오차의 변화율이며, 출력변수는 스로틀 밸브의 각도 및 브레이크라인의 압력으로 구현되는 제어신호  $u$ 이다<sup>10)</sup>. 만일 제어신호  $u$ 가 양이면 스로틀밸브를, 음이면 브레이크 라인 압력을 제어하는 밸브를 구동하게 된다. Fig.3은 입, 출력 퍼지집합에 대한, 삼각형 형태를 갖는 멤버쉽함수를 보여주고 있다. 여기서  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_9$ 은 각 출력부 집합의 중심값들을 나타내며, 이 값들은 후에 기술할 퍼지적응제어법칙에 의하여 순간마다 적절하게 조절된다. 한편, 두 개의 제어변수가 단일값(singleton) 퍼지화방법에 의하여 퍼지추론엔진(fuzzy inference engine)으로 입력되면, 퍼지추론엔진은 Fig.4에서 보는 바와 같은 제어규칙 베이스(rule-base)에 저장된 일련의 언어적인 제어규칙을 바탕으로 출력집합의 귀속도를 결정한다. 본 연구에서, 제어규칙으로서 구현되는 입력집합과 출력집합간의 관계(relation)는 Mamdani가 제안한 퍼지함의(fuzzy implication)를, 추론방식은 최대최소연산방법(max-min operation)을 사용하였다.

추론된 출력집합의 귀속도로부터 최종출력신호를 결정하는 비퍼지화(defuzzification)는 무게 중심법(center average method)을 적용하였고 이는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$\delta \backslash \dot{\delta}$	nvb	nb	ns	ze	ps	pb	pvb
nvb	fnb	fnb	fnl	fnm	fnr	fnz	fnv
nb	fnb	fnl	fnm	fnr	fnz	fnv	fnv
ns	fnl	fnl	fnm	fnr	fnz	fnv	fnm
ze	fnl	fnm	fnr	fnz	fnv	fnm	fnl
ps	fnm	fnm	fnr	fnv	fnm	fnm	fnl
pb	fnr	fnr	fnz	fnv	fnm	fnl	fnr
pvb	fnr	fnr	fnz	fnm	fnl	fnr	fnr

Fig.4 Fuzzy rule

$$u(\delta | \theta) = \frac{\sum_{k=1}^9 \theta_k \mu_k(\theta)}{\sum_{k=1}^9 \mu_k(\theta)} \quad (2)$$

여기서  $\mu_k(\theta)$ 는 최종 추론된 k번째 출력집합의 귀속도를 나타낸다.

2.1.2 퍼지시스템의 함수적 기술

입력변수를 제어오차와 오차의 변화율로, 출력변수를 플랜트의 구동장치 조작신호로하는 퍼지시스템은 일반적으로 다음과 같은 IF~THEN형식으로 된 언어적인 제어규칙으로서 구현된다.

IF  $\delta$  is A and  $\dot{\delta}$  is B, then  $\theta$  is C.

만일 퍼지 추론엔진의 퍼지함의(fuzzy implication) 및 추론방법이 앞 절에서 기술한 바와 같이 정의 되었다면, 추론된 각 출력집합상의 귀속도는 다음과 같이 추론되어진다.

$$\begin{aligned} \mu_{C_i}(\theta) &= (\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta}')) \cdot \mu_{C_i}(\delta, \dot{\delta}, \theta) \\ &= \max\{(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta}')) \wedge (\mu_{A_i}(\delta) \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta}) \wedge \mu_{C_i}(\theta))\} \\ &= \max\{(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{A_i}(\delta)) \wedge (\mu_{B_i}(\dot{\delta}') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta}) \wedge \mu_{C_i}(\theta))\} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식 (2)에서  $\mu_k(\theta_k)$ 를 2개의 입력부를 갖는 경우를 고려하여 (3)식으로 치환하면

$$u(\delta | \theta) = \frac{\sum_{k=1}^9 \theta_k [\nu(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{A_i}(\delta)) \wedge (\mu_{B_i}(\dot{\delta}') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta})) \wedge \mu_{C_i}(\theta)]}{\sum_{i=1}^9 [\nu(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{A_i}(\delta)) \wedge (\mu_{B_i}(\dot{\delta}') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta})) \wedge \mu_{C_i}(\theta)]} \quad (4)$$

식 (4)에서의 최종출력신호 u의 크기는 제어오차, 오차변화율신호 및 출력퍼지집합의 중심값들의 크기에 따라 좌우된다. 여기서 우리는 ‘Fuzzy Basis Function(FBF)’을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\xi_k(\delta, \dot{\delta}) = \frac{\nu(\sum_{k=1}^9 \theta_k [\nu(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{A_i}(\delta)) \wedge (\mu_{B_i}(\dot{\delta}') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta})) \wedge \mu_{C_i}(\theta)]}{\sum_{i=1}^9 [\nu(\mu_{A_i}(\delta') \wedge \mu_{A_i}(\delta)) \wedge (\mu_{B_i}(\dot{\delta}') \wedge \mu_{B_i}(\dot{\delta})) \wedge \mu_{C_i}(\theta)]} \quad (5)$$

FBF는 퍼지논리에 의해 추론된 전체 출력집합의 면적에 대한 k번째 출력집합의 면적의 비를 의미하는 함수이다. 식 (4)를 FBF를 포함하는 식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$u = \sum_{k=1}^9 \theta_k \xi_k(\delta', \dot{\delta}') = \theta' \xi(\delta', \dot{\delta}') \quad (6)$$

식 (6)은 제어오차와 그것의 1계미분값을 입력부로하는 일반적인 퍼지제어시스템을 하나의 함수로서 묘사한다.

2.2 퍼지 적응제어시스템

2.2.1 차량모델

일반적으로 차량의 주행모델은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{m} [F_t - d_m - k_d x^2] \quad (7)$$

여기서  $F_1$ 는 구동력 혹은 제동력을 나타내고  $d_m$ 은 구름저항을,  $k_a \dot{x}^2$ 은 주행중의 공기저항을 나타낸다. 구동력 혹은 제동력을 발생시키는 구동장치에 대한 모델을 속도에 따라 다른 시정수를 갖는 1차원의 동적 모델로 근사화 시킬 수 있으며 이는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau_{a,b} \dot{F}_1 + F_1 = u_{a,b} \quad (8)$$

여기서  $\tau_{a,b}$ 와  $u_{a,b}$ 는 가속(혹은 제동)시의 시정수와 엔진(혹은 브레이크라인)으로 들어가는 제어입력을 나타낸다. 식 (7)을 미분하고 식 (8)을 대입하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{d\ddot{x}(t)}{dt} &= f(\dot{x}, \ddot{x}) + \alpha(\dot{x})u(t) \\ f(\dot{x}, \ddot{x}) &= -2\frac{k_a}{m}\dot{x}\ddot{x} - \alpha(\dot{x})[m\ddot{x} + d_m + k_a\dot{x}^2] \\ \alpha(\dot{x}) &= \frac{1}{m\tau(\dot{x})} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 구동장치로의 제어입력이 이동변위의 3계미분과 직접적으로 연관이 있다는 물리적인 직관을 제공하여 준다. Ioannou는 이 모델을 근거로 하여 입출력선형화 알고리즘(I/O linearization algorithm)을 적용하여 제어법칙을 유도하였다<sup>3)</sup>. 그러나 이렇게 유도된 모델은 주행중 바람이나 경사각의 영향이 무시되었으며 엔진이나 브레이크라인과 같은 복잡한 액츄에이터의 동적거동을 1차원의 선형모델로 근사화시킨 것이다. 따라서 우리는 식 (9)에서 표현된 함수  $f(\dot{x}, \ddot{x})$ 와  $\alpha(\dot{x})$ 는 미지의 함수라고 간주한다.

### 2.2.2 입출력선형화 알고리즘

(I/O linearization algorithm)

식 (9)로부터 통상적인 입출력 선형화법에 의해 유도되는 제어법칙은 다음과 같다. 제어 목적이 요구 궤적(desired trajectory)  $x_d$ 를 추종하는 것이라고 하고,  $x_d$ 를 추종하도록 하는 최적의 제어 입력  $u_d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_d = \frac{1}{\alpha(\dot{x})} [-f(\dot{x}, \ddot{x}) + \ddot{x}] \quad (10)$$

여기서  $x = x_d + \delta$ 와 같이 정의하면 식 (10)은 다음과 같이 된다.

$$u_d = \frac{1}{\alpha(\dot{x})} [-f(\dot{x}, \ddot{x}) + \ddot{x}_d + \ddot{\delta}] \quad (11)$$

제어의 목적은 주행중 안전거리로부터의 일탈 거리  $\delta$ 를 0으로 수렴시키는 것이며 이를 위해 다음과 같은 일탈거리에 관한 선형미분방정식을 고려한다.

$$\text{For } \delta \rightarrow 0, \ddot{\delta} + k_0\dot{\delta} + k_1\delta + k_2\delta = 0 \quad (12)$$

식 (12)는 입출력 선형화 알고리즘에 의하여 유도되는 기본적인 오차 특성식으로 이 알고리즘은 비선형 모델을 비선형 제어를 사용하여 선형화 하는 방법이다. 여기서 계수  $k_0, k_1, k_2$ 는 앞으로 전개될 제어법칙유도에 있어서 매우 중요한 제어파라미터이며 식 (12)의 특성방정식의 근이 s-plane상의 왼쪽에 위치하도록 제어파라미터를 설정해야 할 것이다. 식 (12)를 식 (11)에 대입하여 최종적으로 다음과 같은 제어법칙을 구할 수 있다.

$$u_d = \frac{1}{\alpha(\dot{x})} [-f(\dot{x}, \ddot{x}) + \ddot{x} - k_0\dot{\delta} - k_1\delta - k_2\delta] \quad (13)$$

### 2.2.3 추종 오차 증폭현상의 방지

(Anti-slinky Effect)

AICC system에서 매우 중요한 현안 중의 하나는 소위 'slinky effect'라고 하는 추종 오차 증폭현상을 방지하는 일이다. 추종 오차 증폭현상이란 몇 대의 차량이 선행차량 자동추종 모드로 직선도로를 주행하고 있을 때, 선두차량의 속도가 변함에 따라 뒤따라오는 차량들의 추종 오차가 갈수록 증폭되는 현상으로서, 차량군 전체를 하나의 제어대상으로 간주했을 때 전체적인 안정성(global asymptotic stability)을 잃어버리는 현상이다. 앞 절에서 소개한 제어파라미터  $k_0, k_1, k_2$ 는 바로 이런 현상을 고려하여 선택해야 한다. 식 (12)에

$$\begin{aligned} \delta &= x_1 - x_2 - t_h \dot{x}_2, & \dot{\delta} &= \dot{x}_1 - \dot{x}_2 - t_h \ddot{x}_2 \\ \ddot{\delta} &= \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 - t_h \ddot{\ddot{x}}_2, & \ddot{\delta} &= \ddot{\ddot{x}}_1 - \ddot{\ddot{x}}_2 - t_h \ddot{\ddot{\ddot{x}}}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\underline{e} = \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix}, \quad \underline{k}^T = [k_2 \ k_1 \ k_0] \quad (19)$$

를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\ddot{\ddot{x}}_2 + c_0 \ddot{\ddot{x}}_2 + c_1 \ddot{\ddot{x}}_2 + c_2 \ddot{\ddot{x}}_2 + c_3 \ddot{\ddot{x}}_2 \\ &= \frac{1}{t_h} \ddot{\ddot{x}}_1 + \frac{k_0}{t_h} \ddot{\ddot{x}}_1 + \frac{k_1}{t_h} \dot{\ddot{x}}_1 + \frac{k_2}{t_h} x_1 \\ c_0 &= \frac{1 + t_h k_0}{t_h}, \quad c_1 = \frac{k_0 + t_h k_1}{t_h}, \\ c_2 &= \frac{k_1 + t_h k_2}{t_h}, \quad c_3 = \frac{k_2}{t_h} \end{aligned} \quad (15)$$

선두차량의 속도변화로 인해 야기되는, k번째 차량의 일탈거리  $\delta_k$ 에 대한 k+1번째 차량의 일탈거리  $\delta_{k+1}$ 의 전달함수를  $G(s) = \frac{\Delta_{k+1}(s)}{\Delta_k(s)}$  라고 했을 때,  $\omega > 0$ 에 대하여  $|G(j\omega)| < 1$ 의 조건을 만족하도록 제어파라미터를 설정하면 이론적으로 slinky effect 현상을 방지할 수 있다<sup>3)</sup>.

식 (14)로부터

$$\begin{aligned} \Delta_k(s) &= X_{k-1}(s) - (1 + t_h s) X_k(s) \\ \Delta_{k+1}(s) &= X_k(s) - (1 + t_h s) X_{k+1}(s) \end{aligned} \quad (16)$$

이 나오므로, 따라서  $\frac{\Delta_{k+1}(s)}{\Delta_k(s)}$  는  $\frac{X_{k+1}(s)}{X_k(s)}$  와 동일한 전달함수를 가지게 된다. 이때  $\omega = 0$  근처에서 Taylor 급수 전개를 통하여 위의 조건을 만족시키는 제어파라미터의 조건을 구하면 다음과 같다.

$$k_1^2 < 2k_0 k_2, \quad c_2^2 < 2c_0 c_3 \quad (17)$$

### 2.2.4 접근 안정성 (Asymptotic Stability)

식 (9)에서 식 (13)을 빼면,

$$\ddot{\delta} = -k_0 \delta - k_1 \dot{\delta} - k_2 \delta + \alpha(\dot{x})(u - u_d) \quad (18)$$

여기서 이득(gain) 벡터와 추종오차 벡터를 다음과 같이 정의하면,

식 (18)을 추종 오차에 관한 미분방정식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\delta} = -\underline{k}^T \underline{e} + \alpha(\dot{x})[u - u_d] \quad (20)$$

이를 추종 오차에 관한 벡터 방정식으로 다시 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{\underline{e}} &= \underline{A} \underline{e} + \underline{b}(\dot{x})[u - u_d] \\ \underline{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 & -k_0 \end{bmatrix}, \quad \underline{b}(\dot{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha(\dot{x}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에서 u는 본 논문에서 제안하는 퍼지 논리에 의한 제어법칙이고,  $u_d$ 는 입출력 선형화법에 의해 구한 이상적인 제어법칙이다. 만일 퍼지제어 출력신호  $u$ 가  $u_d$ 와 동일한 제어를 수행한다면 행렬  $\underline{A}$ 는 추종 오차의 동적인 거동을 나타내며 이때 추종 오차의 점근안정성(asymptotic stability)을 확립하기 위하여 다음과 같은 Lyapunov function을 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} \underline{e}^T P \underline{e} \quad (22)$$

만일 다음의 Lyapunov equation을 만족하는 양의 한정성을 갖는 대칭행렬 P가 존재한다면 추종오차벡터  $\underline{e}$ 는 상태 공간상의 원점에서 점근안정성을 만족한다.

$$\underline{A}^T P + P \underline{A} = -I \quad (23)$$

방정식 (23)를 만족시키는 대칭행렬 P는 다음절에서 논의할 적응제어규칙에 직접적으로 영향을 미치는 요소이다.

### 2.2.5 퍼지 적응제어

본 논문에서 제안하는 퍼지제어기는 제어대상의 수학적인 모델과는 무관하게 이루어진다. 따라서 퍼지제어기의 출력신호  $u$ 가 식 (13)에서 구한  $u_d$ 와 동일한 제어를 수행하지 않는다면 추종 오차의 점근 안정성과 추종 오차 증폭현상을 이론적으로 보장할 수 없을 것이다. 만일, 퍼지 제어출력신호가  $u_d$ 에 가장 근접하게 제어를 수행하게 될 때, 그 때의 출력퍼지집합의 중심값들로 이루어진 벡터를  $\hat{\theta}$ 라고 정의한다면 이들 두 제어신호간의 최소오차를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\omega = |u_d - u| \quad (24)$$

이때, 식 (21)을 식 (24)에서 정의한 오차의 향으로 나타내고 퍼지제어기의 출력신호  $u$ 를 식 (5)에서 정의한 FBF를 도입하여 표현하면 다음과 같은 새로운 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = A_e e + b(x) (\hat{\theta} - \theta) \xi(x) - b(x) \omega \quad (25)$$

식 (25)는 식 (24)에서 정의한 오차항까지 고려한 추종 오차에 관한 선형벡터 미분방정식이며 여기서 새롭게 Laypunov function을 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\lambda} (\hat{\theta} - \theta)^T (\hat{\theta} - \theta) \quad (26)$$

식 (26)을 미분하여 정리하면

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\lambda} (\hat{\theta} - \theta)^T (\lambda e^T P_{LC} \xi(x) - \dot{\theta}) - e^T P_{LC} \omega \quad (27)$$

여기서  $P_{LC}$ 는 위에서 정의한 대칭행렬  $P$ 의 마지막 열이다. 식 (27)의 우변에서 첫번째와 세번째 항이 모두 0보다 적음을 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 적용규칙을 구축한다면 식 (27)은 항상  $\dot{V} < 0$ 가 되어 점근 안정성을 만족시킬 수가 있다.

$$\dot{\theta} = \lambda e^T P_{LC} \xi(x) \quad (28)$$

식 (28)의 적용규칙은 제어수행과정에서 샘플링 시간마다 적용되며 차량의 주행조건에 따라 출력퍼지집합의 중심값들을 적절히 변화시켜 선행차량추종에 있어서의 일탈거리를 0으로 수렴시키는 동시에, AICC 차량군의 주행시에 추종 오차 증폭현상의 방지를 보장하여 준다. Fig.5는 퍼지 적용제어의 블럭선도를 보여주고 있다.

### 2.3 필 터

AICC system의 제어를 설계함에 있어서 중요한 현안 중의 하나는 선행차량과의 안전거리를 안정성있게 추종하는 것 이외에도 운전자의 부드러운 승차감을 유지시키는 일이다. 차량추종에 있어서의 승차감은 급가속이나 급감속을  $-0.15g$ 에서  $0.07g$ 정도로 억제할 때 실현될 수 있다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 제어기가 승차감을 고려하지 않을 경우 오로지 안전거리와의 일탈거리를 0으로 수렴시키도록 제어신호를 내보내므로 적어도 다음의 두 가지 상황을 만날 때 무리한 가속이나 감속을 함으로써 승차감을 해치는 동시에 엔진에 무리한 토크를 생성시킬 염려가 있다.

- 1) 주행조건을 수동모드에서 AICC 모드로 전환하는 순간, 혹은 차선을 변경하는 순간 선행차량이  $\delta(0) > 0$ ,  $\dot{\delta}(0) > 0$ 인 상태로 주행하고 있을 경우
- 2) 선행차량이 무리한 급가속을 수행할 경우

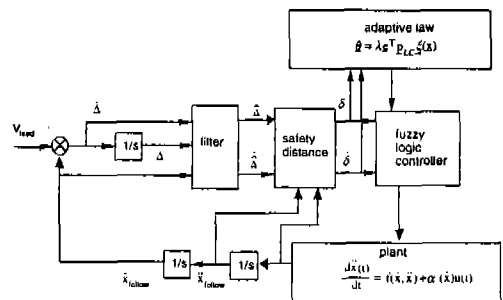


Fig.5 Block diagram of the fuzzy adaptive control

이같은 현상을 방지하기 위해서는 센서로부터 제어기로 입력되는 선행차량과의 거리와 상대속도 신호를 조건에 따라 적절히 완화(attenuation)시키거나 제한(saturation)하여야 한다. Fig.6에서는 초기 일탈거리가 크거나 선행차량의 급가속시에도 규정가속도를 초과하지 않는 조건에서 선행차량을 추종할 수 있도록 설계된 필터의 개념도를 보여준다. 필터에서 나오는 초기 상대거리 및 상대속도신호는  $\delta(0)=0, \dot{\delta}(0)=0$ 가 되도록 세팅되어 있으며, 그 후로 실제상대거리와 상대속도에 수렴하도록 설계한다. Fig.7에서 보는 바와 같이 직선도로상의 가상적인 고정좌표가 존재한다고 가정했을 때, 필터의 인식거리에 해당하는 변수를  $\hat{s}$ 라고 하면,  $\hat{s}$ 의 동적인 거동을 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{s}}{dt} = \hat{s}, \quad \frac{d\hat{s}}{dt} = \hat{s}$$

$$\ddot{\hat{s}} = c_v(v_{follow} + \Delta - \hat{s}) + c_s(s_{follow} + \Delta - \hat{s}) \quad (28)$$

### 3. 시뮬레이션

제안한 퍼지적응 제어기의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 여러 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행은 Hedrick<sup>4)</sup>이 제안한 모델을 사용하여 수행하였다.

#### 3.1 갑작스런 초기조건 변화

주행조건을 AICC 모드로의 전환순간, 혹은 차선변경순간에 선행차량이 추종차량과의 안전거리보다 10m앞서있고, 속도가 10km/h 만큼 빠른 속도로 주행하고 있을 때, 추종차량의 속도 및 가속도를 Fig.7.1, 7.2에서 보여주고 있다. 필터의 완화 및 포화작용으로 인해 규정가속도를 초과하지 않는 부드러운 추종을 하고 있음을 알 수 있다. Fig.7.3, 7.4는 안전거리로 부터의 일탈거리, 제어입력인 스톱과각과 브레이크라인의 압력등을 보여주고 있다. 여기서 최대 및 최소규정 가속도는  $2m/s^2, -1.2m/s^2$ 이라 가정하였다.

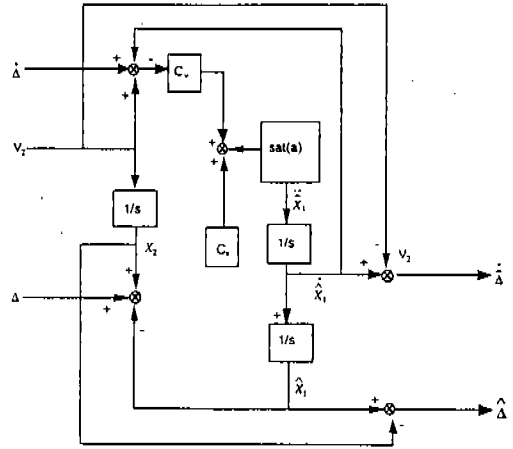


Fig.6 AICC filter

#### 3.2 선행차량의 급가속

Fig.8.1, 8.2는 선행 차량이  $\delta(0)=0, \dot{\delta}(0)=0$ 의 초기주행상태로부터 최대규정가속도( $2m/s^2$ )보다 큰  $2.5m/s^2$ 의 갑작스러운 급가속을 함에도 불구하고 추종차량은 규정가속도를 초과하지 않는 부드러운 주행을 유지하며 선행차량을 추종하고 있음을 보여주고 있다.

#### 3.3 갑작스런 외란

퍼지적응제어기의 성능을 검증하기 위하여 다음과 같은 상황을 가정하였다. 주행도중, 5초에서 10초사이에 3,500N의 외란(강한 바람)이 주행반대 방향으로 작용한다고 했을 때 적응제어기와 적응루틴을 제거한 보통 퍼지제어기의 제어성능을 비교하였고 Fig.9.1, 9.2에서 이를 보여주고 있다. 보통의 퍼지제어기는 극단적인 강한외란에 관하여 접근 안정성을 만족시키지 못하였으나 적응제어기의 적응규칙은 극소추종의 안전성을 보장하도록 제어순간마다 출력퍼지집합의 중심값을 조정시키기 때문에 매우강한 외란에도 불구하고 접근안정성을 만족하며 선행차량을 추종하고 있음을 알 수 있다.



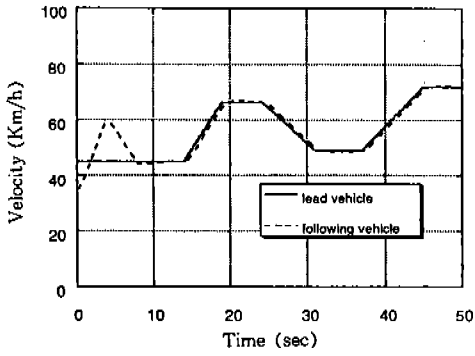


Fig.7.1 Velocity profile

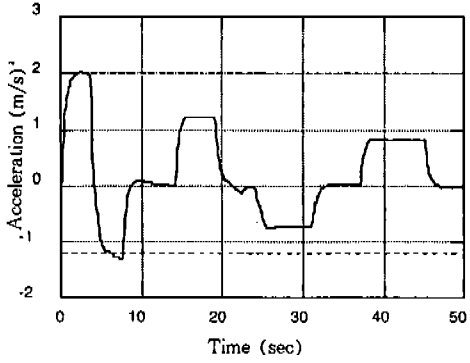


Fig.7.2 Acceleration profile

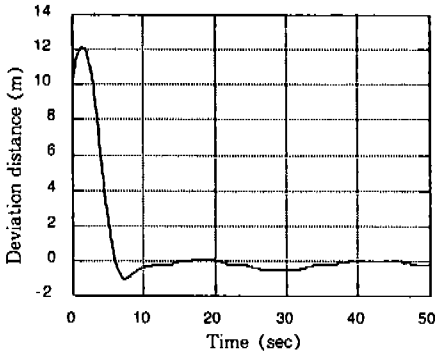


Fig.7.3 Distance deviation profile

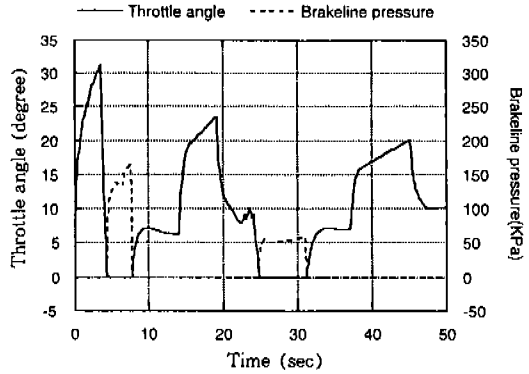


Fig.7.4 Actuator profile

Fig.7 Performance of the fuzzy adaptive control with large initial condition

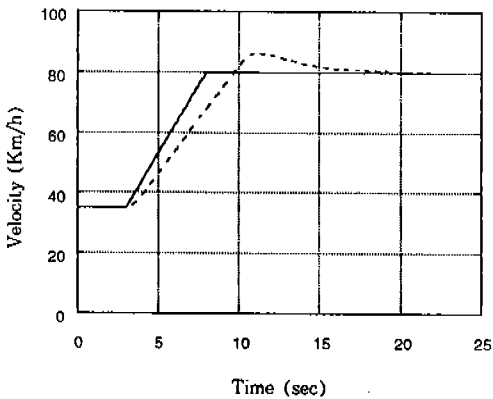


Fig.8.1 Velocity profile

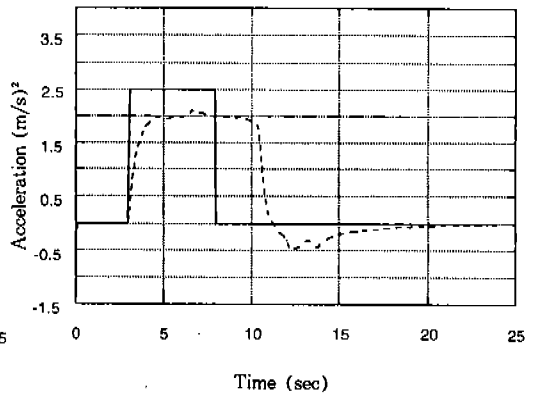


Fig.8.2 Acceleration profile

Fig.8 Performance of the fuzzy adaptive control with instantaneously large acceleration of lead vehicle

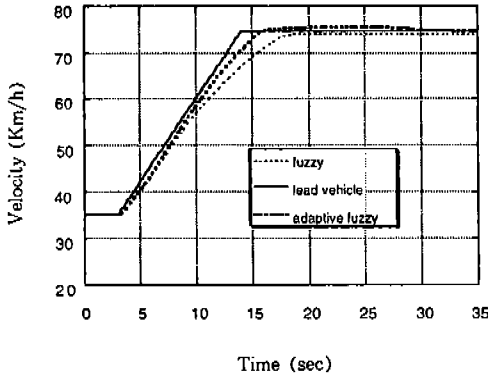


Fig.9.1 Velocity profile

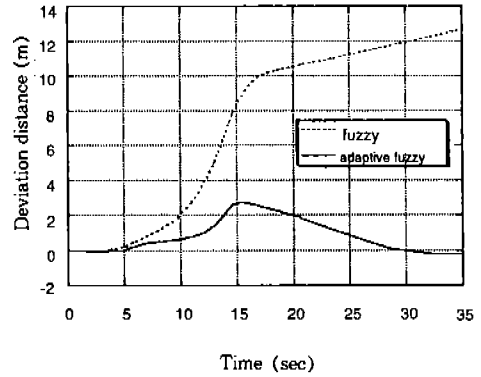


Fig.9.2 Distance deviation profile

Fig.9 Performance of the fuzzy adaptive control with instantaneous disturbance

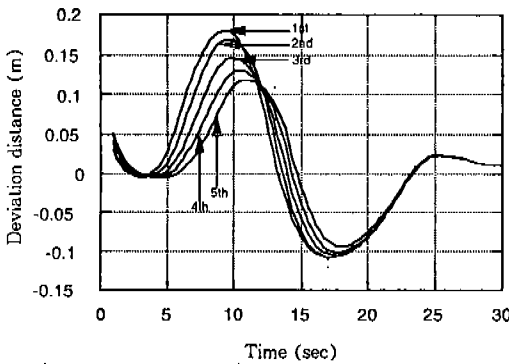


Fig.10.1 Velocity profile

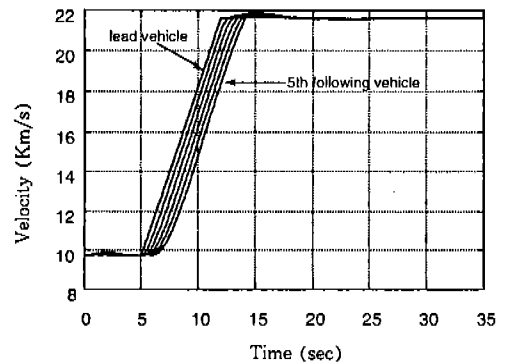


Fig.10.2 Distance deviation profile

Fig.10 Anti-slinky effect of platoon

### 3.4 추종 오차 증폭현상의 방지

2.2.3절에서 차량 오차 증폭현상을 방지하는 제어파라미터의 조건을 유도하였다. 여기서는 선두차량의 속도 프로파일을 미리 정하여 놓고 5대의 차량이 추종하는 상황을 가정하고 시뮬레이션을 하였다. Fig.10.1은 차량군의 속도 프로파일을 Fig.10.2는 안전거리로부터의 일탈거리 프로파일을 보여주며 차량 오차 증폭현상이 방지되고 있음을 알 수 있다. 즉, 일탈거리가 첫번째 차량과 두번째 차량과의 일탈거리에 비해 증폭되고 있지 않음을 보여주고 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서 퍼지논리를 이용한 제어기의 장점과 전통적인 모델 기반의 비선형 제어방법(model-based nonlinear control)의 장점을 살린 퍼지적응제어기를 구축하였다. 제한한 제어기는 갑작스러운 초기조건 변화나 선행차량의 급가속시에도 가속도 규정을 만족하여 승차감을 해치지 않으며 외란에도 매우 강한 특성을 보여주며 극소적인 안정성은 물론 차량군의 안정성도 보장하여 준다. 무엇보다도 차량자체의 특성에 관계없이 제어가 수행되기 때문에 AICC system 개발

이 독자적으로 수행될 수 있으며 차종에 관계없이 범용적으로 적용시킬수 있으리라 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원으로 수행되었으며(과제번호: 95-0200-09-02-3), 한국과학재단 여러분께 감사드립니다.

부 록

본 논문에서는 제어법칙의 유도 및 제안한 제어알고리즘의 성능분석을 위하여 Cho and Hedrick<sup>[1]</sup>이 제안한 4개의 상태변수를 갖는 주행모델을 도입하였다. 이 모델이 내포하고 있는 가정은 다음과 같다.

- 1) 흡입다기관 내의 공기는 이상기체법칙을 만족하며 온도는 일정하다.
- 2) 엔진의 토크생성에 있어서의 시간지연요소(점화순간부터 토크생성, 실린더로의 공기 유입부터 토크생성까지의 시간지연)는 무시한다.
- 3) 토크컨버터의 토크전달과정 및 변속메카니즘은 무시한다.
- 4) 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation)은 무시한다.

Fig.11은 본 논문에서 사용한 차량주행모델의 개념도를 보여준다.

위의 가정과 모델개념도를 토대로 미분방정식을 열거하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a_i} - \dot{m}_{a_o}$$

$$\dot{m}_{a_i} = \max \cdot TC(\alpha) \cdot PRI(P_m/P_a)$$

$$\dot{m}_{a_o} = c\eta_v(P_m \omega_e)m_a\omega_e$$

$$P_m = \frac{\bar{R}_m T_m}{V_m} m_a$$

$$\dot{P}_m = \left[ \left[ \frac{\dot{T}_m}{T_m} \right] - c\omega_e\eta_v \right] \cdot P_m + \left[ \frac{RT_m}{V_m} \right] \dot{m}_{a_i}$$

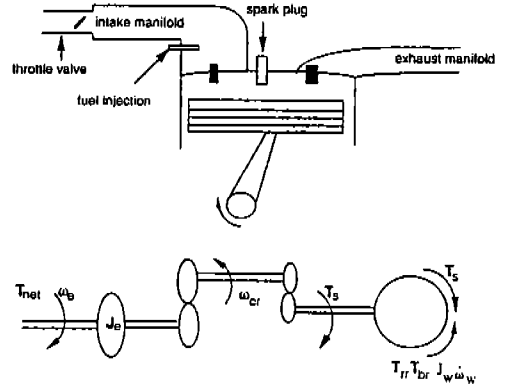


Fig.11 The physical model of simplified powertrain model

$$T_{int} = \frac{c_i \dot{m}_{a_o}(t - \Delta t_{it}) A F I(t - \Delta t_{it}) S I(t - \Delta t_{st})}{\omega_e(t - \Delta t_{it})}$$

$$J_e^* \dot{\omega}_e = T_{int} - T_{fric} - R_g R_d (T_{br} + hF_r) - C_d^* \omega_e^2$$

$$J_e^* = J_e + R_g^2 R_d^2 (J_w + Mh^2)$$

$$C_d^* = C_d h^2 R_g^2 R_d^3$$

$$v = h\omega_w = hR_g R_d \omega_e$$

$$M\dot{v} = F_t - C_d v^2 - F_r$$

$T_{net}$  : 엔진의 정미 토크

$T_{br}$  : 브레이크 토크

$T_{fric}$  : 엔진 내 마찰 토크

$T_{int}$  : 엔진 생성 토크

$J_e$  : 엔진의 회전 관성

$J_e^*$  : 등가 회전 관성

$\omega_e$  : 엔진의 회전 속도

$\omega_{cr}$  : 변속기 출력 회전 속도

$T_s$  : 구동축 회전 토크

$T_{rr}$  : 구름 마찰 토크

$R_g$  : 트랜스미션의 변속비

$R_d$  : 최종 가속비

$J_w$  : 차륜 회전 관성

$\omega_w$  : 차륜 회전 속도

$m_a$  : 흡기 다기관내 공기 질량  
 $P_m$  : 흡기 다기관내 압력  
 $V_m$  : 흡기 다기관내 체적  
 $T_m$  : 흡기 다기관내 온도  
 $C_d^*$  : 등가 공기 저항 계수  
 $C_d$  : 공기 저항 계수  
 $h$  : 차륜 반지름  
 $\eta_v$  : 체적 효율

### 참 고 문 헌

1. P. Ioannou, Z. Xu, "Throttle and Brake Control Systems for Automatic Vehicle Following", PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-94-10, 1994.
2. R. Mayr, "Intelligent Cruise Control for Vehicles Based on Feed-back Linearization", American Control Conference, Vol. 1, pp. 16~20, 1994.
3. C. C. Chien, P. Ioannou, "Automatic Vehicle Following", Proceedings of the American Control Conference, Vol. III, pp. 1748~1752, Chicago, 1992.
4. Shahab Sheikholeslam, Charles A. Desoer, "Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles", PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-89-3, 1989.
5. J. K. Hedrick, McMahon, D. Swaroop, "Vehicle Modelling and Control for Automated Highway Systems", DRAFT PATH PROGRES REPORT, 1992.
6. C. C. Chien, P. Ioannou, M. C. Lai, "Entrainment and Vehicle Following Controllers Design for Autonomous Intelligent Vehicles", American Control Conference, pp. 6~10, 1994.
7. Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems And Control", PTR Prentice Hall, 1994.
8. 박문용 외 역, "퍼지시스템의 응용입문", 대영사, 1990.
9. P. Ioannou, F. Ahmed-Zaid, "A Time Headway Autonomous Intelligent Cruise Controller: Design and Simulation", California PATH Working Paper, 1994.
10. 최재성, 장광수, "퍼지제어를 위한 차량간격 자동제어 장치", 한국자동차공학회 추계 학술대회논문집, Vol. 2, pp. 368~375, 1995.
11. D. Cho, J. K. Hedrick, "Automotive powertrain Modeling for Control", Trans. of the ASME, Vol. III, pp. 567~576, Dec. 1989.