

# T-S Fuzzy Model-Based Energy-to-Peak Control of a Vehicle Longitudinal Control System Using a Complementary State Feedback Controller

상호 보완적 상태 피드백 제어를 이용한  
차량 종방향 제어 시스템의 T-S 퍼지 모델 기반 에너지 대 피크 제어

Young Jun Hwang · Kwanghoon Seok · Han Sol Kim

황영준\* · 석광훈\* · 김한솔†

## Abstract

This paper proposes a novel Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model-based state feedback controller design scheme that uses an auxiliary controller to improve the performance of the adaptive cruise control (ACC) system by employing the energy-to-peak control technique. In the proposed controller design scheme, the auxiliary control input is treated as a disturbance affecting the overall control input. Then, by limiting the norm of the auxiliary control input, the energy-to-peak control technique is applied to obtain the state feedback gain which guarantees the stabilization of the ACC system represented as a T-S fuzzy model. To find the controller gain, we propose linear matrix inequality (LMI)-based sufficient conditions to ensure both asymptotic stability and the energy-to-peak performance. Finally, we show that the steady-state error of the ACC control system can be improved by using the proposed control scheme from the simulation results.

## Key Words

Takagi-Sugeno (T-S), adaptive cruise control (ACC), linear matrix inequality (LMI), gain perturbation, energy-to-peak performance

## 1. 서론

최근 자동차 산업은 놀라운 기술 발전을 이루어내고 있다. 이러한 발전으로 자동차의 안전성, 효율성, 그리고 운전자의 편의성이 획기적으로 향상되었다. 특히, 자율주행 자동차 기술이 이러한 변화의 중심에 있으며, 그중에서도 적응형 ACC (Adaptive Cruise Control) 기술은 현재 상용화된 자동차에 광범위하게 적용되고 있다. ACC는 전방 차량과의 거리 정보를 기반으로 ego 차량의 속도를 자동으로 조절하여, 차량 간의 간격을 일정하게 유지하는 기술을 의미한다. 이 기술은 운전자의 편의성을 크게 증대시키는 동시에, 교통 안전성의 향상에도 기여하고 있다[1-3].

한편, 구동기와 같은 주요 구성 요소에서 발생할 수 있는 예기치 못한 결함은 ACC 시스템과 같이 사용자의 안전이 보장되어야 하는 제어 시스템에서 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 결함은 구동기의 기계적 노후화, 계측기기의 측정 정밀도 저하, 그리고 연산 과정에서의 반올림 오류로 인해 제어기 이득 매개변수의 불확실성이 초래될 때 발생할 수 있다[4].

이러한 문제를 해결하기 위해, non-fragile control [5,6],  $H_\infty$  control [7,8], sliding mode control, model reference adaptive control [9], self-tuning control 등의 제어 방법이 활발히 연구되고 있다. 특히 non-fragile control 기법은 제어 입력의 변동 범위에 대한 정보만을 바탕으로 시스템의 안정성을 보장하는 제어를 설계하는 기법이며, 최근 선형 행렬 부등식 (Linear matrix inequality, LMI)을 기반으로 한 non-fragile control 기법 [10]을 통해 제어 입력의 변동에 대응하는 연구가 진행되고 있다[11, 12]. 또한, 시스템의 변동뿐만 아니라 외부 요인에 의한 외란에 강인한 제어 시스템 설계를 위해, 외란의 총 에너지 대비 시스템 출력의 피크치 비율을 제한하는 ETP (energy-to-peak) control 기법[13, 14]에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

기존 ACC 관련 연구는 주로 PD (Proportional-Derivative) 제어기와 같은 선형 제어 이론을 기반으로 진행되고 있으나[15, 16], PD 제어기는 정상 상태 오차를 완전히 제거할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 이와 유사하게, 상태 피드백 제어기 또한 시스템의 정상 상태 응답 성능을 개선하는 데에는 한계가 있

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Republic of Korea.  
E-mail : [hansol@dankook.ac.kr](mailto:hansol@dankook.ac.kr)  
<https://orcid.org/0000-0002-8803-4381>

\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Republic of Korea.  
<https://orcid.org/0009-0001-2040-0584> <https://orcid.org/0009-0008-3648-2968>

Received : Sep. 20, 2024 Revised : Dec. 07, 2024 Accepted : Dec. 17, 2024

다. 따라서 제어기에 적분기를 추가하는 형태의 제어기 구조의 도입이 필수적이나, 이러한 제어기 구조는 LMI를 통한 설계가 어렵다는 한계를 지니므로, 이에 대한 새로운 접근 방식이 요구된다.

한편, 자동차와 같이 비선형 동역학 방정식으로 표현되는 시스템에 대해, 동역학 방정식을 IF-THEN 규칙에 따라 정의한 소속도 함수와 선형 부분 시스템의 집합으로 구성된 Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지 모델 기반 제어가 연구되고 있다[17, 26]. 이 접근법은 기존의 선형 제어 기법을 활용하여 비선형 시스템의 제어기를 설계할 수 있는 장점을 제공하며, 특히 시스템의 복잡성을 줄이는 동시에, 비선형 특성을 효과적으로 반영하여, 실질적인 제어 성능을 높이는데 기여하고 있다.

앞선 분석에 착안하여, 본 논문에서는 차량 종방향 제어 시스템의 성능을 개선하기 위해, 상태 피드백 제어기에 임의의 보조 제어 입력을 추가한 상호 보완적 상태 피드백 제어기 구조를 제안하며, ETP 성능 [18]을 만족하는 LMI 기반의 제어기 설계 조건을 제안한다. 이를 위해 비선형 차량 종방향 시스템의 T-S 퍼지 모델을 유도하고, 제안된 방법이 ACC 시스템의 정상 상태 오차를 개선함을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 본 논문의 주요 기여 사항은 다음과 같다.

1. 상호 보완적 제어기와 ETP 성능 지표를 도입하여 차량 종방향 제어 성능을 개선한다.
2. 비선형 차량 종방향 시스템을 T-S 퍼지 모델로 유도하여 기존 선형 제어 기법의 한계를 극복한다.
3. Morai 시뮬레이터를 활용하여 제안한 기법이 ACC 시스템의 정상 상태 오차 개선에 효과적임을 검증한다.

## 2. Preliminaries

본 논문에서 다루는 차량의 종방향 동역학은 다음과 같은 선형 미분방정식의 형태로 표현된다고 가정한다[19].

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t), \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $p_i(t)$ ,  $v_i(t)$ 는  $i$ 번째 차량의 위치[m], 속도[m/s]이다. 본 논문에서  $i=0$ 은 선행 차량을 나타내고,  $i=1$ 은 ego 차량을 의미한다. Ego 차량의 종방향 가속도[m/s<sup>2</sup>]는 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 결정된다 ( $i=1$ ).

$$\dot{a}_i(t) = -\left\{\frac{1}{\tau_i} + \frac{2K_{d,i}}{m_i}v_i(t)\right\}a_i(t) - \frac{K_{d,i}}{\tau_i m_i}v_i^2(t) + \frac{1}{\tau_i}u_i(t), \quad (2)$$

여기서  $u_i(t)$ ,  $\tau_i$ ,  $m_i$ ,  $K_{d,i}$ 는  $i$ 번째 차량의 제어 입력[m/s<sup>2</sup>], 엔진 동역학 등으로 결정되는 시간 상수[s<sup>-1</sup>], 총 질량[kg], 공기 저항 계수[Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]를 의미한다.

한편, 제어기 설계를 용이하게 하기 위해, ego 차량과 달리

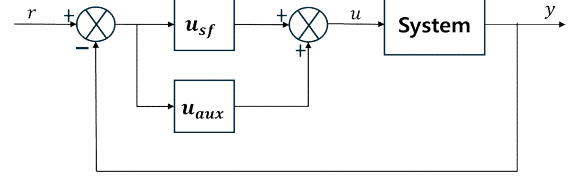


그림 1 제안하는 제어기 구조

Fig. 1 The structure of the proposed controller

선행 차량의 가속도는 다음의 선형 동역학으로 표현한다.

$$\dot{a}_0(t) = \frac{1}{\tau_0} \{-a_0(t) + u_0(t)\}. \quad (3)$$

선행 차량과 ego 차량 간 거리는 다음과 같이 나타낸다.

$$d(t) = p_0(t) - p_1(t).$$

또한, ACC에서 선행 차량과 일정한 시간 간격을 유지하며 주행하는 CTH (Constant time headway) 방법에서 현재 차량과 선행 차량과의 목표 차간 거리는 다음과 같이 정의된다[20].

$$\hat{d}(t) = d_s + \lambda v_1(t),$$

여기서  $d_s$ 는 정지 상태에서의 간격인 standstill distance[m]이고,  $\lambda$ 는 선행 차량과의 headway time[s]이다.

이제, 선행 차량과 ego 차량 간의 목표 거리 오차 및 속도 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \tilde{d}(t) &= \hat{d}(t) - d(t), \\ \tilde{v}(t) &= v_0(t) - v_1(t). \end{aligned} \quad (4)$$

식 (1-4)를 정리하여 ACC 시스템의 비선형 동역학 방정식을 다음의 T-S 퍼지 모델로 표현한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) \{A_i x(t) + B u_1(t) + B_w w(t)\} + X(t), \\ z(t) &= C x(t), \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $x(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ ,  $u_1(t) \in \mathbb{R}^1$ ,  $w(t) \in \mathbb{R}^1$ 는 각각 상태, 제어 입력, 외란 입력이며 시스템 내의 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} \tilde{d}(t) \\ \tilde{v}(t) \\ a_1(t) \\ a_0(t) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_0} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \\ A_i &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & a_{33,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_0} \end{bmatrix}, \quad a_{33,i} = -\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{2K_{d,i}}{m_1}v_{1i}\right), \end{aligned}$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{K_{d,1}}{\tau_1 m_1} v_1^2(t) & 0 \end{bmatrix}^T.$$

한편,  $h_i(v_1(t)) \in \mathbb{R}_{[v_{11}, v_{12}]}$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙에 대한 소속도 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$h_1(v_1(t)) = \frac{v_{12} - v_1(t)}{v_{12} - v_{11}}, \quad h_2(v_1(t)) = 1 - h_1(v_1(t)).$$

이때  $v_{11}$ 과  $v_{12}$ 는 각각 ego 차량의 최소 속도와 최대 속도를 의미하며,  $\sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) = 1$ 을 만족한다.

식 (2)의 가속도 동역학에는  $v_1(t)a_1(t)$ 와  $v_1^2(t)$ 의 비선형항이 존재한다. 이들을 모두 전제 변수로 설정하면 퍼지 규칙의 수가 증가하여 제어기 설계 조건의 보수성이 커진다. 이를 방지하기 위해, 본 논문에서는 다음의 feedback linearization 방법을 적용하여  $v_1^2(t)$  항을 제거한다.

$$u_1(t) = \bar{u}_1(t) + \frac{K_{d,1}}{m_1} v_1^2(t), \quad (6)$$

$$\bar{u}_1(t) = u_{sf}(t) + u_{aux}(t). \quad (7)$$

식 (6)을 (5)에 대입하면,  $v_1^2(t)$ 에 의한 비선형 항인 식 (5)의  $X(t)$  항을 제거할 수 있다.

또한,  $u_{sf}(t) = K_i x(t)$ 는 상태 피드백 제어기로 다음의 퍼지 제어기 구조를 가진다.

$$u_{sf}(t) = \sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) K_i x(t),$$

여기서  $K_i \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙의 제어 이득 행렬이다.

한편, 식 (7)의  $u_{aux}(t)$ 는 norm의 상한값을 아는 보조 제어기로, 그림 1과 같은 상호 보완적 상태 피드백 제어기 구조를 구성하는 데 사용된다. 본 논문에서는  $u_{aux}(t) = S(t)x(t)$ 의 형태로 임의의 비선형 함수  $S(t)$ 에 상태 벡터가 비례하는 제어 규칙을 가진다고 가정한다. 특히  $S(t)$ 는 정확한 함수 구조는 모르지만 norm의 상한은 알고 있다고 가정하며, 이를 알고 있는 상수 행렬  $D \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ ,  $E \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 와  $F^T(t)F(t) \leq I$ 를 만족하는 미지의 시변 행렬  $F(t) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 의 곱인  $S(t) = DF(t)E$ 의 형태로 표현된다고 가정한다[21].

이제 식 (5)의 페루프 시스템에 제안하는 제어기 식 (6)과 (7)을 대입하면 다음과 같은 페루프 상태 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) \{ (A_i + BK_i + BDF(t)E)x(t) + B_w w(t) \} \\ &= \sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) \{ \bar{A}_i x(t) + B_w w(t) \}. \end{aligned} \quad (8)$$

**요약 1.** 본 논문에서는 일반적인 상태 피드백 제어기의 형태  $u_{sf}(t) = \sum_{i=1}^2 h_i(v_1(t)) K_i x(t)$ 에 임의의 제어기가 추가된 식 (7) 형태의 제어기를 제안한다. 시뮬레이션에서는  $S(t)x(t)$ 가  $x(t)$ 를 적분하는 것으로 모델링하여 시스템의 type을 증가시키고, 이를 통해 정상 상태 오차를 개선할 수 있음을 보인다.

마지막으로 제안하는 제어기 설계 조건을 유도하기 위해 필요한 보조 정리를 소개하며 본 장을 마무리한다.

**보조 정리 1.** [22] 적절한 차원의 실수 행렬  $X$ ,  $Y$ 와  $F^T(t)F(t) \leq I$ 를 만족하는  $F(t)$ 가 존재할 때, 임의의 상수  $\epsilon > 0$ 에 대해 다음의 행렬 부등식은 항상 성립한다.

$$X^T F(t) Y + Y^T F^T(t) X \leq \epsilon X^T X + \epsilon^{-1} Y^T Y$$

### 3. LMI 기반 제어기 설계

본 장에서는 다음의 문제를 해결하는 차량 종방향 제어 시스템의 이득 행렬  $K_i$ 를 설계하기 위한 조건을 제시한다.

**문제 1.** 보조 제어기가 포함된 식 (6)의 페루프 시스템에 대해 아래의 가정을 만족하는 제어 이득 행렬  $K_i$ 를 찾아라.

- 1) 식 (5)의 페루프 시스템은 모든  $t \geq 0$ 에서  $w(t) = 0$ 인 경우 점근 안정하다.
- 2) 제어 입력  $u(t)$ 는 임의의 양의 실수  $\mu$ 에 의해 제한된 상한값을 갖는다.

$$\|u(t)\| \leq \mu$$

- 3) 식 (5)의 페루프 시스템이 영의 초기 조건을 만족하는 경우에 아래의 부등식을 만족한다.

$$\psi(t) := \frac{\|z(t)\|_{\infty}}{\|w(t)\|_2} < \Gamma$$

이때  $\Gamma > 0$ 는 주어진 상수로 ETP를 의미한다.

다음의 정리는 문제 1의 설계 조건을 만족하는 제어 이득 행렬  $K_i$ 를 구하기 위한 LMI 기반의 충분 조건을 제시한다.

**정리 1.** 주어진 양의 스칼라  $\Gamma$ ,  $\mu$ 와  $\epsilon$ 에 대해 다음의 LMI를 만족하는 양정의 행렬  $P \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 와 임의의 행렬  $\bar{K}_i \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ ,  $i \in \{1, 2\}$ 가 존재하면, 페루프 시스템 (5)은 문제 1의 설계 목표를 만족한다. 이때, 제어 이득 행렬은  $K_i = \bar{K}_i P^{-1}$ 으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Omega & * & * \\ EP & -\epsilon I & * \\ B_w^T & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \text{ for } i \in \{1, 2\}, \quad (9)$$

$$CPC^T < \Gamma^2 I, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I & * \\ x(0) & P \end{bmatrix} > 0, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} P & \bar{K}_i^T \\ * & \mu^2 I \end{bmatrix} > 0, \text{ for } i \in \{1, 2\}, \quad (12)$$

여기서  $\Omega = A_i P + P A_i^T + \overline{B K_i} + \overline{K_i}^T B^T + \epsilon B D D^T B^T$ 이다.

**증명:** 먼저, 식 (8)의  $\overline{A_i}$ 는 아래와 같다.

$$\overline{A_i} = A_i + B K_i + B D F(t) E. \quad (13)$$

한편 다음의 부등식이 성립한다고 가정하자.

$$\overline{A_i} P + P \overline{A_i}^T + B_w B_w^T < 0, \quad C P C^T < \Gamma^2 I. \quad (14)$$

식 (14)의 첫 번째 부등식에 Schur complement를 적용하면 다음을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \overline{A_i} P + P \overline{A_i}^T & * \\ B_w^T & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (15)$$

위 식 (15)에  $\text{diag}\{P^{-1}, I\}$ 로 congruence transformation을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P^{-1} \overline{A_i} + \overline{A_i}^T P^{-1} & * \\ B_w^T P^{-1} & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (16)$$

식 (16)의 좌변을  $\Lambda$ 라 하고  $\eta(t) = \{x(t), w(t)\}$ 로 congruence transformation을 적용하면 다음이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^2 \eta^T(t) \Lambda \eta(t) < 0. \quad (17)$$

이제 식 (17)을 전개하면 다음의 부등식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 (x^T(t) P^{-1} \overline{A_i} x(t) + x^T(t) \overline{A_i}^T P^{-1} x(t)) \\ & + w^T(t) B_w^T P^{-1} x(t) + x^T(t) P^{-1} B_w w(t) - w^T(t) w(t) \\ & = \sum_{i=1}^2 \{x^T(t) P^{-1} (\overline{A_i} x(t) + B_w w(t)) \\ & + (\overline{A_i} x(t) + B_w w(t))^T P^{-1} x(t)\} - w^T(t) w(t) < 0. \end{aligned} \quad (18)$$

또한, 식 (8)로부터 (18)은 아래와 같다.

$$x^T(t) P^{-1} \dot{x}(t) + \dot{x}^T(t) P^{-1} x(t) - w^T(t) w(t) < 0. \quad (19)$$

이는 Lie 미분법[23]에 의해 아래의 식과 동일하다.

$$\frac{d}{dt} (x^T(t) P^{-1} x(t)) - w^T(t) w(t) < 0. \quad (20)$$

만약 Lyapunov candidate를 다음과 같이 설정한다면,

$$V(t) = x^T(t) P^{-1} x(t),$$

식 (20)으로부터  $w(t) = 0$ 인 경우 식 (14)의 첫 번째 부등식이 만족하면 문제 1의 조건 1이 만족함을 알 수 있다.

또한,  $x(0) = w(0) = 0$ 이라 하고 식 (20)을  $0 \leq t \leq t_f$  구간에서 적분하면 아래와 같은 부등식을 얻는다.

$$x^T(t_f) P^{-1} x(t_f) < \int_0^{t_f} w^T(t) w(t) dt. \quad (21)$$

한편,  $l_2$  norm 정의[24]로부터 아래의 부등식은 자명하다.

$$\int_0^{t_f} w^T(t) w(t) dt \leq \|w(t)\|_2^2. \quad (22)$$

따라서 (21)와 (22)로부터 아래가 성립함을 알 수 있다.

$$\|w(t)\|_2^2 - x^T(t_f) P^{-1} x(t_f) \geq 0. \quad (23)$$

이제 식 (23)에 Schur complement를 적용하면 다음을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \|w(t)\|_2^2 & * \\ x(t_f) & P \end{bmatrix} \geq 0. \quad (24)$$

위 식 (24)에  $\text{diag}\{I, C^T\}$ 으로 congruence transformation을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \|w(t)\|_2^2 & * \\ z(t_f) & C P C^T \end{bmatrix} \geq 0. \quad (25)$$

식 (25)에 Schur complement를 다시 적용하면 아래와 같다.

$$C P C^T - z(t_f) \|w(t)\|_2^2 z^T(t_f) \geq 0.$$

양변에  $\|w(t)\|_2^2 \geq 0$ 을 곱하고, 식 (14)의 두 번째 부등식을 이용하면 다음을 얻는다.

$$z(t_f) z^T(t_f) \leq \|w(t)\|_2^2 C P C^T < \|w(t)\|_2^2 \Gamma^2 I.$$

따라서 식 (14)의 두 번째 부등식이 성립하면 아래가 성립한다는 것을 알 수 있고,

$$z(t_f) z^T(t_f) < \|w(t)\|_2^2 \Gamma^2 I, \quad (26)$$

이로부터 식 (9-10)의 LMI가 만족되면 문제 1의 조건 3을 보장함을 증명한다.

한편, 식 (14)의 첫 번째 부등식은 시변 변수를 포함하는  $D F(t) E$  항을 포함하고 있으므로 적절한 변환과 치환을 통해 LMI 형태로 유도해야 한다.

식 (14)의 첫 번째 부등식을 전개하여 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & A_i P + P A_i^T + B K_i P + P^T K_i^T B^T \\ & + B D F(t) E P + P E^T F^T(t) D^T B^T + B_w B_w^T < 0. \end{aligned} \quad (27)$$

식 (27)에  $\overline{K_i} = K_i P$ 로 치환하여 정리하면 다음을 얻는다.

$$A_i P + P A_i^T + B \bar{K}_i^T + \bar{K}_i^T B^T + B D F(t) E P + P E^T F^T(t) D^T B^T + B_w B_w^T < 0, \quad (28)$$

여기에 보조 정리 1을 적용하면 아래가 성립한다.

$$B D F(t) E P + P E^T F^T(t) D^T B^T \leq \epsilon B D D^T B^T + \epsilon^{-1} P E^T E P$$

위의 관계식을 식 (28)에 적용하면 아래와 같다.

$$(26) \leq A_i P + P A_i^T + B \bar{K}_i^T + \bar{K}_i^T B^T + \epsilon B D D^T B^T + \epsilon^{-1} P E^T E P + B_w B_w^T < 0,$$

여기에 Schur complement를 두 번 적용하여 식 (9)를 얻을 수 있다. 따라서 식 (9), (10)의 부등식이 성립하면 페루프 제어 시스템 (5)이 ETP  $\Gamma$ 를 만족한다.

한편, 식 (11)-(12)은 문제 1의 조건 2를 보장하는 조건으로 [25]에서 증명되어 있으므로 증명을 생략한다. ■

**요약 2.** 제안하는 조건을 통해 설계된  $u_{sf}(t)$ 의 상태 피드백 제어기는 문제 1의 조건을 만족하나, 정상 상태 오차 등의 성능 목표를 만족하기 어렵다. 그러나 본 논문에서는 제안하는 설계 방식은 norm의 상한이 제한된 임의의  $u_{aux}(t)$ 을 제어 시스템에 추가하여도 문제 1의 조건을 만족하기 때문에, 적절한  $u_{aux}(t)$ 을 설계하여 추가적인 성능 개선이 가능하다. 이에 착안하여, 본 논문에서는 다음과 같이 설계하였다.

$$u_{aux}(t) = S(t)x(t) = K_f \int_0^t [1 \ 0 \ 0 \ 0] x(\tau) d\tau.$$

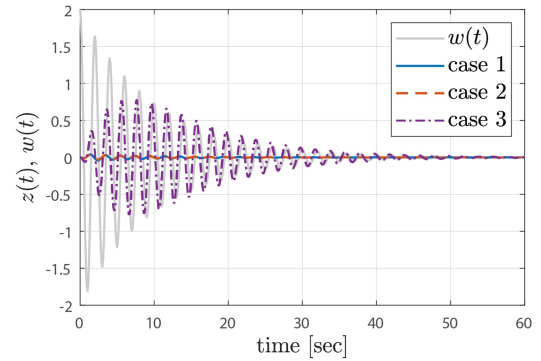
이때  $K_f$ 는 주어진 양의 스칼라이며,  $S(t)$ 는 위의 식을 만족하는 어떤 비선형 함수로 norm의 상한만을 알고 있다.

## 4. 시뮬레이션 예제

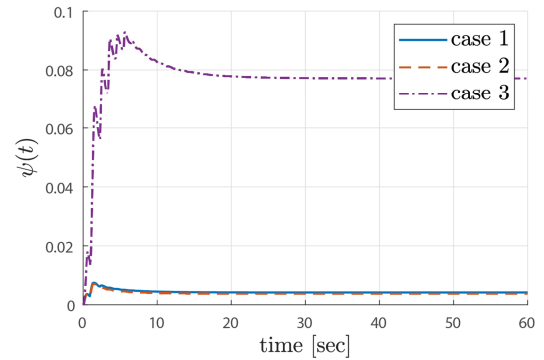
### 4.1. 제어기 설계

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법을 통해 설계한 ACC 제어 시스템의 성능을 분석한다. 먼저, 보조 제어기의  $S(t)$ 는  $\pm 1$  내에서 크기가 변한다고 가정하였고, 이를  $D = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,  $E = \text{diag}\{1, 0, 0, 0\}$ 을 통해 설정했다.

정리 1에서 임의로 설정할 수 있는 파라미터는  $\epsilon = 10$ ,  $\mu = 5$ ,  $\Gamma = 4$ ,  $\lambda = 3$  [s]으로 설정했다. 또한, 실험 차량은 Morai 시뮬레이터 내의 GV70 차량을 사용했으며,  $m = 2325$  [kg],  $\tau = 0.3$  [s],  $K_d = 0.31$  [Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]의 물리적인 파라미터를 가진다. 마지막으로 시뮬레이션에서 ego 차량의 속도는  $0 \leq v_1(t) \leq 20$  [m/s]의 범위를 가진다고 가정했다. 이러한 조건에서 정리 1의 LMI를 해석하여 다음의 제어기 이득 행렬을 얻었다.



(a)



(b)

그림 2 (a) 외란  $w(t)$ 와 출력  $z(t)$ 의 시간 응답; (b) ETP 성능지표의 시간 응답.

Fig. 2 (a) The time response of the disturbance,  $w(t)$ , and the output,  $z(t)$ ; (b) The time response of the ETP.

$$K_1 = [-1.4093 \quad 0.7076 \quad -1.0129 \quad 0.0848]$$

$$K_2 = [-1.4095 \quad 0.7077 \quad -1.0115 \quad 0.0848].$$

이어지는 시뮬레이션 예제에서 case 1은 위의 제어 이득과 (27)의  $u_{aux}(t)$ 를 사용한 경우로,  $K_f = 1$ 로 설정했다. 한편, case 2는 case 1에서  $u_{aux}(t) = 0$ 를 사용하여 보조 제어기를 제거한 경우이고, case 3는 [24]에서 제안된 기본적인 Lyapunov 안정도 조건을 만족하는 LMI 기반 제어기 설계 조건을 이용하여  $u_{sf}(t)$ 의 이득을 다음과 같이 결정한 경우이다.

$$K_1 = [-0.9596 \quad 0.4081 \quad 0.6024 \quad 0.0018]$$

$$K_2 = [-0.9596 \quad 0.4081 \quad 0.6040 \quad 0.0018].$$

마지막으로, 선행 차량 추종 성능을 검증하기 위해  $d_s = 15$ 으로 설정했고, ACC 시스템의 상태변수  $x(t)$  및 각 차량의 초기 조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad v_0(0) = 0, \quad v_1(0) = 0.$$

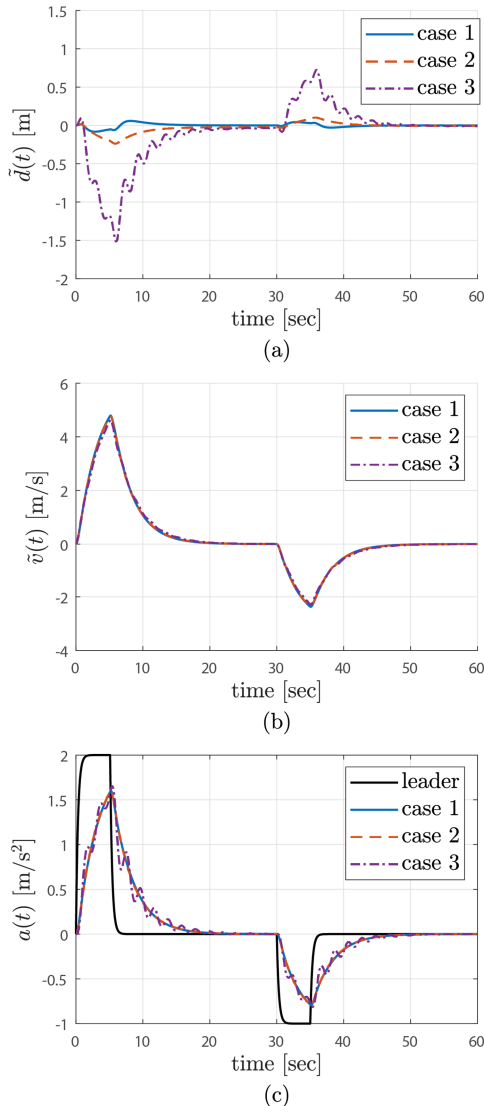


그림 3 (a) 거리 추종 오차의 시간 응답; (b) 속도 추종 오차의 시간 응답; (c) 차량 가속도의 시간 응답

Fig. 3 (a) The time response of the distance tracking error; (b) The time response of the velocity tracking error; (c) The time response of the acceleration of vehicles.

#### 4.2. 예제 1: ETP 성능 검증

본 예제에서는 ETP 성능을 검증하기 위해 임의의 외란으로  $w(t) = 2e^{-0.1t}\cos(\pi t)$ 을 사용했으며, 이에 대한 시스템의 출력과 ETP 성능 지표  $\psi(t)$ 를 구하였다. 그림 2의 (a)는 인가된 외란  $w(t)$ 와 제어된 시스템의 출력  $z(t)$ 의 시간 응답을 나타낸다. Case 1과 case 2의 결과로부터 시스템의 과도 응답에  $u_{aux}(t)$ 의 영향이 미미하다는 것을 알 수 있다. 한편 case 3은 ETP가 고려되지 않아 외란에 취약한 것을 알 수 있다.

또한  $\psi(t)$ 를 비교한 결과는 그림 2의 (b)와 같다. 그림으로부터 제안된 방법으로 설계한 제어 시스템은 외란이 인가되는 상황에서도 출력값의 피크치가 작게 유지되어 보다 안정화된 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

#### 4.3. 예제 2: ACC 제어 성능 검증

본 예제에서는 Matlab을 이용하여 식 (5)로 표현되는 차량 동역학을 이용해 각 case 별 ACC 제어 성능을 비교한다. 실험에서 선행 차량의 입력을 다음과 같이 설정하여 선행 차량의 속도가 시간에 따라 가변되도록 하였다.

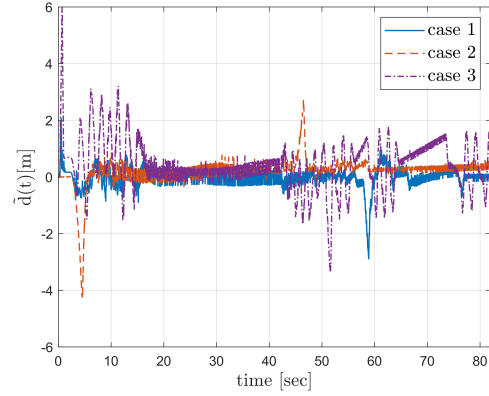


그림 4 거리 추종 오차의 시간 응답 그래프.

Fig. 4 Time response of the distance tracking error.

$$u_0(t) = \begin{cases} 2, & \text{for } 0 \leq t < 5 \\ 0, & \text{for } 5 \leq t < 30 \\ -1, & \text{for } 30 \leq t < 35 \\ 0, & \text{for } 35 \leq t \end{cases}$$

그림 3은 시뮬레이션 결과를 보이는데, 그림 3의 (a)는 거리 추종 오차 그래프로, 세 경우의 제어기 모두 선행 차량과 목표한 거리를 유지하도록 제어하는 것을 알 수 있다. 그러나 case 1은 적분 제어를 추가하여 case 2에 비해 정상 상태 오차가  $5.9248 \times 10^{-3}m$ 에서  $2.3736 \times 10^{-5}m$ 로 약 249배 개선되었다. 한편, case 3은 외란에 대한 ETP 성능을 고려하지 않았으므로, 시스템에 외란으로 작용하는 선행 차량의 입력으로 인해 선행 차량이 가속하는 구간에서 거리 추종 오차가 다른 경우에 비해 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

또한, 본 실험에서 거리 추종 오차를 시스템의 출력으로 설정했기 때문에 ETP는 속도나 가속도의 성능에는 영향을 끼치지 않는다. 따라서 그림 3의 (b)와 (c)로부터 알 수 있듯이 속도 추종 오차나 가속도에서는 case 1의 방법이 다른 case에 비해 크게 개선된 성능을 내지는 않았다.

#### 4.4. 예제 3: Morai 실험 검증

실제 차량에서의 제어 성능 검증을 위해 상용 자율주행 시뮬레이터인 Morai를 이용한 실험을 진행했다. 실험에서 선행 차량은 Morai 시뮬레이터 내의 속도 제어 명령을 이용하여 다음의 속도로 주행하도록 제어되었다.

표 1  $\tilde{d}(t)$ 의 실효값.

Table 1 RMS value of the distance tracking error.

	case 1	case 2	case 3
RMS( $\tilde{d}(t)$ ) [m]	0.3205	0.5363	0.9090

$$v_0(t) = \begin{cases} 0\text{m/s}, & \text{for } 0 \leq t < 2 \\ 13.89\text{m/s}, & \text{for } 2 \leq t < 42 \\ 6.94\text{m/s}, & \text{for } 42 \leq t \end{cases}$$

예제 2와 마찬가지로 총 세 가지 경우의 제어기를 사용하여 선행 차량을 추종하도록 하였고, 그림 4는  $\tilde{d}(t)$ , 즉 거리 추종 오차의 상태 응답 그래프로 case 2에 비해 case 1의 경우에 정상 상태 오차가 개선되어 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 한편, case 3는 선행 차량이 가속하는 구간에서 목표 거리오차가 크게 증가하는 제어 응답을 얻는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 제어 기법은 ETP 성능 조건을 만족하며 적은 오차를 달성함을 알 수 있고, 표 1의 RMS 오차를 통해 case 1의 경우 추가된 보조 제어기로 인해 거리 추종 오차가 개선된 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자율주행 자동차의 핵심 기술 중 하나인 ACC 시스템의 성능 개선을 위해 보조 제어 입력을 추가한 새로운 제어기 구조를 제안하였다. 이를 위해 T-S 퍼지 모델을 이용하여 비선형 동역학을 가진 ACC 시스템을 모델링하였으며, ETP 성능과 점근 안정성을 보장하는 LMI 형태의 충분 조건을 제시하였다. 보조 제어기는 적분 제어기의 형태를 가지도록 하여 정상 상태 오차를 개선할 수 있도록 하였다. 특히, 상용 자율주행 시뮬레이터인 Morai를 통한 실험에서는 보조 제어기의 사용으로 인해 기본 상태 피드백 제어기에 비해 약 67.3% 개선된 성능을 낸다는 것을 확인하였다.

### Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00251621). This research was also supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program (IITP-2024-RS-2024-00437102) supervised by the IITP (Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation)

### References

[1] L. Yu, and R. Wang, "Researches on adaptive cruise control system: a state of the art review," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 236, pp. 211-240, 2022.

[2] Y. H. Jang, and H. S. Kim, "Sampled-Data Cooperative Adaptive Cruise Control for String-Stable Vehicle Platooning with Communication Delays: A Linear Matrix Inequality Approach," Machines, vol. 12, no. 3, pp. 165, 2024.

[3] S. E. Shladover, "Connected and automated vehicle systems: introduction and overview," Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 3, pp.190-200, 2018.

[4] A. A. Amin, and K. M. Hasan, "A review of fault tolerant control systems: advancements and applications," Measurement, vol. 143, pp. 58-68, 2019.

[5] A. J. van der Schaft, " $L_2$ -gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state-feedback  $H_\infty$  control," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 37, no. 6, pp. 770-784, 1992.

[6] T. J. Han, and H. S. Kim, "Disturbance observer-based nonfragile fuzzy tracking control of a spacecraft," Advances in Space Research, vol. 71, no. 9, pp. 3600-3612, 2023.

[7] B. Zhang, S. Zhou, and T. Li, "A new approach to robust and non-fragile  $H_\infty$  control for uncertain fuzzy systems," Information Sciences, vol. 177, no. 22, pp. 5118-5133, 2007.

[8] S. Zhou, G. Feng, J. Lam, and S. Xu, "Robust  $H_\infty$  control for discrete-time fuzzy systems via basis-dependent Lyapunov functions," Information Sciences, vol. 174, no. 3-4, pp. 197-217, 2005.

[9] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, and A. S. Morse, "Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36, no. 11, pp. 1241-1253, 1991.

[10] K. R. Lee, E. T. Jeung, and H. B. Park, "Robust fuzzy  $H_\infty$  control for uncertain nonlinear systems via state feedback: an LMI approach," Fuzzy Sets and Systems, vol. 120, no. 1, pp. 123-134, 2001.

[11] M. Shahbazzadeh, and H. Salehifar, "Optimal non-fragile control design for linear systems under amplitude and rate saturation: An LMI approach," European Journal of Control, vol. 75, article. 100933, 2024.

[12] S. Fallah, A. Khajepour, B. Fidan, S. -K. Chen, and B. Litkouhi, "Vehicle optimal torque vectoring using state-derivative feedback and linear matrix inequality," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 4, pp. 1540-1552, 2013.

[13] H. Du, and J. Lam, "Energy-to-peak performance controller design for building via static output feedback under consideration of actuator saturation," Computers & Structures, vol. 84, no. 31-32, pp. 2277-2290, 2006.

[14] W. Zhang, Y. Chen, and H. Gao, "Energy-to-peak control for seismic-excited buildings with actuator faults and parameter uncertainties," Journal of Sound and Vibration, vol. 330, no. 4, pp. 581-602, 2011.



- [15] O. Can Tolun, and O. Tutsoy, "Modelling and performance-based PD controller of the electric autonomous vehicles with the environmental uncertainties," *Journal of Engineering Research*, vol. 11, no. 2, pp. 100059, 2023.
- [16] L. You, Y. Dong, and X. Bing, "PD-like finite time controller with simple structure for satellite attitude control," *Defence Technology*, vol. 26, pp. 123-133, 2023.
- [17] H. S. Kim, K. Lee, and Y. H. Joo, "Decentralized sampled-data fuzzy controller design for a VTOL UAV," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 3, pp. 1888-1914, 2021.
- [18] X. Zhou, Z. Wang, and J. Wang, "Automated ground vehicle path-following: A robust energy-to-peak control approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 14294-14305, 2022.
- [19] Y. Zhu, J. Wu, and H. Su, "V2V-based cooperative control of uncertain, disturbed and constrained nonlinear CAVs platoon," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1796-1806, 2022.
- [20] C. Wu, Z. Xu, Y. Liu, C. Fu, K. Li, and M. Hu, "Spacing policies for adaptive cruise control: a survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50149-50162, 2020.
- [21] X. Li, F. Zhu, A. Chakrabarty, and S. H. Žak, "Nonfragile fault-tolerant fuzzy observer-based controller design for nonlinear systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 1679-1689, 2016.
- [22] Z. Lian, Y. He, C. -K. Zhang, P. Shi, and M. Wu, "Robust  $H_\infty$  control for T-S fuzzy systems With state and input time-varying delays via delay-product-type functional method," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 27, no. 10, pp. 1917-1930, 2019.
- [23] T. J. Willmore, "The definition of lie derivative," *Proc. Edinburgh Math. Soc.*, vol. 12, no. 1, pp. 27-29, 1960.
- [24] G. E. Dullerud, and F. Paganini, "A course in robust control theory," New York, Springer, 2000.
- [25] K. Tanaka, and H. O. Wang, "Fuzzy control systems design and analysis," John Wiley & Sons, 2001.
- [26] S. Lee, S. Hwang, and H. S. Kim, "T-S Fuzzy Observer-Based Output Feedback Lateral Control of UGVs Using a Disturbance Observer," *Drones*, vol. 8, no. 11, pp. 685-712, 2024.


**석광훈(Kwanghoon Seok)**

He is currently an undergraduate student in the Department of Electronics and Electrical Engineering at Dankook University.


**김한솔(Han Sol Kim)**

He received his B.S. in Electronics and Computer Engineering from Hanyang University (2011) and M.S. and Ph.D. in Electrical and Electronic Engineering from Yonsei University (2012, 2018). He was a Senior Engineer at Samsung Electronics (2018 ~2019) and an Associate Professor at Korea Maritime and Ocean University (2019-2023). Since 2023, he has been with Dankook University.

#### 저자소개


**황영준(Young Jun Hwang)**

He is currently an undergraduate student in the Department of Electronics and Electrical Engineering at Dankook University.