

# T-S 퍼지 모델 기반 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어기 설계

## Design of Buoyancy and Moment Controllers of a Underwater Glider Based on a T-S Fuzzy Model

이 경 학\* · 김 도 완\*  
(Gyeonghak Lee · Do Wan Kim)

**Abstract** - This paper presents a fuzzy-model-based design approach to the buoyancy and moment controls of a class of nonlinear underwater glider. Through the linearization and the sector nonlinearity methodologies, the underwater glider dynamics is represented by a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. Sufficient conditions are derived to guarantee the asymptotic stability of the closed-loop system in the format of linear matrix inequality (LMI). Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed buoyancy and moment controllers for the underwater glider.

**Key Words** : Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model, Underwater glider, Lyapunov stability, Linear matrix inequalities (LMI), Linearization

### 1. 서 론

수중글라이더(underwater glider)는 종종 플로트로부터 진화한 해양 무인 탐사체이며 부력변화와 내부 무게추의 이동과 날개를 통해 추진력을 얻는다. 수중글라이더의 궤적은 톱니모양을 나타내며 원하는 지점을 비행기처럼 활강하여 이동하도록 고안되었다. 수중글라이더의 개념은 미국 우즈홀 해양 연구소의 헨리 스톰멜 박사에 의해 언급되었으며 글라이더의 종류에는 스크립스/우주홀의 스프레이 글라이더(spray glider), 워싱턴 대학의 씨글라이더(sea-glider), WRC사의 슬로컴 글라이더(slocum glider)가 존재한다[10,11].

최근 수중글라이더의 동역학 해석 및 제어를 위한 다양한 기법들이 연구되었다[1-7]. [1-3]에서는 시상면(sagittal plane)에서 수중글라이더의 모델링을 실시하고 특이섭동(singular perturbation) 기법을 통해 동역학 해석을 제안하였다. [4]는 선형화 모델을 이용한 모델기반 피드백 제어기를 설계하였다. 하지만 선형 제어기는 전역 안정도를 만족시키지 못한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 [5-7]은 피드백 선형화 기법을 이용한 토크 제어, 부력 및 모멘트 제어와 관측기 기반 부력 및 모멘트 제어를 통한 비선형 제어기를 설계함으로써 수중글라이더의 안정화를 제시하였다. 피드백 선형화 제어 기법은 피드백 선형화를 위한 상태변수들의 선형 변환과 비선형 변환과의 미분동형사상이어야

하는 한계를 가지며 계산상의 복잡성을 가진다[7]. 특히 [1-3], [6,7]에서 제안한 제어기의 특징은 수중글라이더의 부력변화와 승강타의 제어에 의한 힘-모멘트의 상호작용을 고려한 동역학을 바탕으로 제어기를 설계하였다.

한편 타카기-수게노(Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지(fuzzy) 모델 기반 제어 기법은 복잡한 비선형 시스템의 모델링을 효율적으로 나타낼 수 있으며 제어기 설계가 간편하다는 장점을 가진다[12, 17]. 다른 수중 운동체에 대한 퍼지 모델 기반 제어에 대한 연구 [8,9,16]는 이루어져 있지만 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어 설계에 대한 퍼지 모델 연구는 전무한 실정이다. 제어기 설계의 용이성과 전역 안정도를 만족하는 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어를 위해 퍼지 모델 기반 제어기법의 연구가 필요하다. 본 논문에서는 부력 및 모멘트 제어를 위한 T-S 퍼지 모델을 이용한 제어기 설계 기법을 소개한다. 부력제어입력에 대한 변화와 승강타 제어를 고려한 비선형 수중글라이더의 동역학은 선형화(linearization)[14]와 부채꼴 비선형성(sector nonlinearity)[13]을 이용하여 수중글라이더의 동역학은 퍼지 모델로 표현된다. 이때, 유도된 T-S 퍼지 시스템이 점근적(asymptotic) 안정하면 실제 비선형 수중글라이더 또한 점근적 안정함을 증명한다. 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어를 위한 점근적 안정화(asymptotic stabilization) 조건은 리아프노브(Lyapunov) 안정도 기준을 이용하여 선형행렬부등식(linear matrix inequality: LMI) 형태로 유도된다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 검증한다.

**표기법** :  $P > Q$ 는 행렬  $P-Q$ 가 양한정(positive definite)임을 의미한다.  $\mathbb{B}_r$ 는  $\Delta_r \in \mathbb{R}_{>0}$ 를 가지는 볼(ball)  $\{\eta: \|\eta\| \leq \Delta_r\}$ 을 의미한다.  $\mathbb{I}_r$ 은  $\mathbb{I}_r := \{1, \dots, r\}$ ,  $r \in \mathbb{R}_{>1}$ 로 정의된다.

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea.

E-mail: dowankim@hanbat.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea.

Received : September 27, 2016; Accepted : November 15, 2016

## 2. 본 론

### 2.1 수중글라이더 동역학

수중글라이더의 동역학 모델링을 기술하기 위해서 관성좌표계  $e_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ ,  $e_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ 와  $e_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ 를 정의하고, 그림 1에서  $e_2$ 방향의 모멘트 제어입력  $u_2$ 와 결합계수  $\delta$ 에 의한  $e_3$ 방향의 상호작용 힘  $F = \delta V^2 u_2$ 를 고려하자. 이때  $F$ 는 수중글라이더의 롤링, 피칭, 요잉에 영향을 미친다. 뉴턴 제 2 법칙과 운동량 방정식에 의해 유도된 수중글라이더 동역학은 다음과 같다[6]:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{m}(m_0 g \sin\phi + D - F \sin\alpha) \\ \dot{\phi} &= \frac{1}{mV}(-m_0 g \cos\phi + L + F \sin\alpha) \\ \dot{\alpha} &= \Omega_2 - \frac{1}{mV}(-m_0 g \cos\phi + L + F \sin\alpha) \\ \dot{\Omega}_2 &= \frac{M}{J_2} = \frac{M_2 + M_f}{J_2} \end{aligned} \quad (1)$$

다음의 새로운 상태변수들과 제어입력을 고려하자

$$\begin{aligned} \tilde{V} &= V - V_e, & \tilde{\phi} &= \phi - \phi_e, & \tilde{m}_0 &= m_0 - m_{0_e} \\ \tilde{\alpha} &= \alpha - \alpha_e, & \tilde{\Omega}_2 &= \frac{K_q}{K_M} \Omega_2, & \tilde{u}_2 &= u_2 - u_{2_e} \end{aligned}$$

여기서  $V$ 는 경로방향의 속도,  $\phi$ 는 경로각,  $m_0$ 는 수중글라이더의 질량에서 수중글라이더 부피에 상응하는 물의 질량을 뺀 값이며 부력조절기에 의해 조절 가능한 값,  $\alpha$ 는 받음각,  $K_q$ 는 피칭감

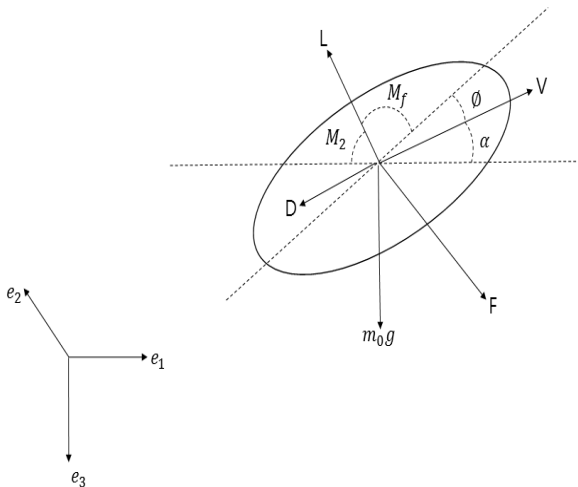


그림 1 좌표 프레임에 의한 힘과 모멘트를 고려한 수중글라이더 구조

Fig. 1 The schematic of an underwater glider with forces and moments defined in the corresponding coordinate frames

쇠계수,  $K_M$ 은 피치모멘트계수이다, 아래첨자 ‘e’는 각각의 평형점을 나타낸다. 상태변수들과 평형점 사이의 관계는 다음과 같다 [7, 15]:

$$\begin{aligned} V_e &= \left( \frac{|m_0|g}{\sqrt{K_{D_e}^2 + K_{L_e}^2}} \right)^{1/2}, \phi_e = \arctan\left(-\frac{K_{D_e}}{K_{L_e}}\right), \\ m_{0_e} &= \pm \left(\frac{1}{g}\right) \sqrt{K_{D_e}^2 + K_{L_e}^2} V_e^2, \alpha_e = -\frac{K_{M_0}}{K_M}, \Omega_{2_e} = 0, \\ u_{2_e} &= \frac{K_{M_0}}{K_M} + \alpha_e \end{aligned}$$

여기서  $K_{D_e} = K_{D_0} + K_{D_e} \alpha_e^2$ ,  $K_{L_e} = K_{L_0} + K_{L_e} \alpha_e$ 이다. 이때 0-평형점을 갖는 비선형 수중글라이더 동역학식[3]은

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{V}} &= -\frac{1}{m}((\tilde{m}_0 + m_{0_e})g \sin(\tilde{\phi} + \phi_e) + D - F \sin(\tilde{\alpha} + \alpha_e)) \\ \dot{\tilde{\phi}} &= \frac{1}{m(\tilde{V} + V_e)}(-(\tilde{m}_0 + m_{0_e})g \cos(\tilde{\phi} + \phi_e) + L + F \cos(\tilde{\alpha} + \alpha_e)) \\ \dot{\tilde{m}}_0 &= u_1 \\ \dot{\tilde{\alpha}} &= \frac{K_M}{K_q} \tilde{\Omega}_2 - \frac{1}{m(\tilde{V} + V_e)}(-(\tilde{m}_0 + m_{0_e})g \cos(\tilde{\phi} + \phi_e) + L + F \cos(\tilde{\alpha} + \alpha_e)) \\ \dot{\tilde{\Omega}}_2 &= \frac{K_q}{J_2} = (\tilde{\alpha} + \tilde{\Omega}_2 - \tilde{u}_2)(\tilde{V} + V_e)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

이 된다, 여기서  $m$ 은 수중글라이더 동체의 질량,  $\Omega_2$ 와  $J_2$ 는  $e_2$ 방향의 각속도와 관성모멘트를 각각 의미한다. 또한,  $D$ ,  $L$ ,  $M_2$ ,  $M_f$ 는

$$\begin{aligned} D &= (K_{D_0} + K_{D_e} \alpha^2) V^2 \\ L &= (K_{L_0} + K_{L_e} \alpha) V^2 \\ M_2 &= (K_{M_0} + K_{M_e} \alpha + K_q \Omega_2) V^2 \\ M_f &= -K_M u_2 V^2 \end{aligned}$$

이다, 여기서  $D$ 와  $L$ 은 항력과 양력을 나타내며  $K_{D_0}$ 와  $K_{D_e}$ 는 항력계수,  $K_{L_0}$ 와  $K_{L_e}$ 는 양력계수,  $K_{M_0}$ 는 피치모멘트 계수이다. 상태변수  $x := [\tilde{V} \ \tilde{\phi} \ \tilde{m}_0 \ \tilde{\alpha} \ \tilde{\Omega}_2]^T$ 와 부력제어입력  $u_1$ 과 모멘트 제어입력  $\tilde{u}_2$ 를 고려한  $u := [u_1, \tilde{u}_2]^T$ 를 정의하면 비선형 수중글라이더 동역학

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3)$$

을 얻을 수 있다, 여기서

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 & g_1 \\ 0 & g_2 \\ 1 & 0 \\ 0 & -g_2 \\ 0 & g_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 f_1 &= -\frac{1}{m}((x_3+m_{0_e})g\sin(x_2+\phi_e)+(K_{D_0}+K_D(x_4+\alpha_e)^2)(x_1+V_e)^2) \\
 f_2 &= -\frac{1}{m}\left(\frac{x_3+m_{0_e}}{x_1+V_e}g\cos(x_2+\phi_e)r-(K_{L_0}+K_L(x_4+\alpha_e))(x_1+V_e)\right) \\
 f_3 &= -f_2 + \frac{K_M}{K_q}x_5, \quad f_4 = \frac{K_q}{J_2}(x_4+x_5)(x_1+V_e)^2 \\
 g_1 &= \frac{1}{m}\delta(x_1+V_e)^2\sin(x_4+\alpha_e) \\
 g_2 &= \frac{1}{m}\delta(x_1+V_e)\cos(x_4+\alpha_e) \\
 g_3 &= -\frac{K_q}{J_2}(x_1+V_e)^2.
 \end{aligned}$$

### 2.2 T-S 퍼지 모델

다음은 T-S 퍼지 모델의 정의이다 :

Rule  $i$  : IF  $z_1$  is  $M_{i_1}$  and ... and  $z_p$  is  $M_{i_p}$ ,

$$\text{THEN } \dot{x} = A_i x + B_i u,$$

여기서  $x \in \mathbb{R}^n$ 은 상태변수;  $u \in \mathbb{R}^m$ 은 제어입력;  $i \in \mathbb{I}_R$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙;  $z_h, h \in \mathbb{I}_p$ 는  $h$ 번째 전방부 변수;  $M_{i_h}, (i, h) \in \mathbb{I}_r \times \mathbb{I}_p$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙에서  $z_h$ 의 퍼지 집합이다. 전체 퍼지 시스템은

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \theta_i(z)(A_i x + B_i u)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,

$$\theta_i(z) = \frac{w_i(z)}{\sum_{i=1}^r w_i(z)}, \quad w_i(z) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j).$$

함수  $\theta_i(z)$ 는

$$0 \leq \theta_i(z) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^r \theta_i(z) = 1.$$

을 만족한다.

### 3. 주요 결과

**문제 1** 비선형 수중글라이더 동역학 (3)을 고려하자. 주요 문제는

(2)를 점근적 안정화시키는  $u$ 를 설계하는 것이다.

**명제 1** 비선형 수중글라이더 동역학 (3)의 부분 선형화 모델은 다음과 같이 표현된다:

$$\dot{x} = \hat{f}(x) + g(x)u \quad (4)$$

여기서

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \mu_1 & a_3 & 0 \\ a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_4 - a_5 & -a_6 & -a_7 & K_M/K_q & \\ 0 & 0 & 0 & \mu_2 & \mu_2 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = -\frac{1}{m}(2K_{D_0}V_e + 2\alpha_e^2 V_e K_D), \quad a_2 = -\frac{1}{m}m_{0_e}g\cos\phi_e,$$

$$a_3 = -\frac{1}{m}(2K_D\alpha_e V_e^2),$$

$$a_4 = \frac{m_{0_e}g\cos\phi_e}{mV_e^2} + \frac{K_{L_0} + K_L\alpha_e}{m}, \quad a_5 = \frac{m_{0_e}g\sin\phi_e}{mV_e},$$

$$a_6 = -\frac{g\cos\phi_e}{mV_e}, \quad a_7 = \frac{K_L V_e}{m}$$

$$\mu_1 = -\frac{1}{m}g\sin(x_2 + \phi_e), \quad \mu_2 = \frac{K_q}{J_2}(x_1 + V_e)^2.$$

**증명:** 수중글라이더 (3)의 부분 선형화 (partial linearization) [14]

$$\left. \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ -\frac{1}{m}(K_{D_0} + K_D(x_4 + \alpha_e)^2)(x_1 + V_e)^2 \right\} \right|_{x=0} =: a_1$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ -\frac{1}{m}m_{0_e}g\sin(x_2 + \phi_e) \right\} \right|_{x=0} =: a_2$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x_4} \left\{ -\frac{1}{m}(K_{D_0} + K_D(x_4 + \alpha_e)^2)(x_1 + V_e)^2 \right\} \right|_{x=0} =: a_3$$

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{x=0} =: a_4, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{x=0} =: a_5, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \right|_{x=0} =: a_6, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \right|_{x=0} =: a_7$$

를 통해서 간략화된 비선형 동역학 (4)를 유도할 수 있다. ■

**명제 2**  $x \in \mathbb{B}_x$ 일 때, (4)는 모델링 오차 없이 다음과 같은 퍼지 시스템으로 표현될 수 있다:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{32} \theta_i(A_i x + B_i u) \quad (5)$$

여기서  $\theta_i, A_i, B_i, i \in \mathbb{I}_{32}$ 는 부록 A 참고.

**증명:** 부채꼴 비선형성 기법[13]을 이용하여,  $x \in \mathbb{B}_x$ 일 때

$$\mu_1 = \hat{\theta}_{11}\hat{a}_{11} + \hat{\theta}_{12}\hat{a}_{12}$$

$$\mu_2 = \hat{\theta}_{21}\hat{a}_{21} + \hat{\theta}_{22}\hat{a}_{22}$$

$$g_1 = \hat{\theta}_{31}b_{11} + \hat{\theta}_{32}b_{12}$$

$$g_2 = \hat{\theta}_{41}b_{21} + \hat{\theta}_{42}b_{22}$$

$$g_3 = \hat{\theta}_{51}b_{31} + \hat{\theta}_{52}b_{32}$$

이 만족됨을 알 수 있다. 여기서  $\hat{\theta}_{11}, \hat{\theta}_{12}, \hat{\theta}_{21}, \hat{\theta}_{22}, \hat{\theta}_{31}, \hat{\theta}_{32}, \hat{\theta}_{41}, \hat{\theta}_{42}, \hat{\theta}_{51}, \hat{\theta}_{52}, \hat{a}_{11}, \hat{a}_{12}, \hat{a}_{21}, \hat{a}_{22}, b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}, b_{31}, b_{32}$ 는 부록 A에 제시.  $\sum_{j=1}^2 \hat{\theta}_{ij} = 1, i \in \mathbb{I}_5$ 을 만족하기 때문에, (4)는

$$\dot{x} = \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_3=1}^2 \sum_{i_4=1}^2 \sum_{i_5=1}^2 \hat{\theta}_{i_1} \hat{\theta}_{i_2} \hat{\theta}_{i_3} \hat{\theta}_{i_4} \hat{\theta}_{i_5} \times \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \hat{a}_{i_1} & a_3 & 0 \\ a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_4 & -a_5 & -a_6 & -a_7 & K_M/K_q \\ 0 & 0 & 0 & \hat{a}_{i_2} & \hat{a}_{i_2} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 & b_{i_3} \\ 0 & b_{i_4} \\ 1 & 0 \\ 0 & -b_{i_4} \\ 0 & b_{i_5} \end{pmatrix} u$$

으로 표현할 수 있다. 결국, 부록 A에 제시된 정의의  $\theta_i, A_i, B_i, i \in \mathbb{I}_{32}$ 를 이용하여, 비선형 동역학 (4)는 모델링 오차없이 32개의 규칙수를 갖는 퍼지 시스템 (5)로 표현된다. ■

**보조정리 1**  $x \in \mathbb{B}_x$ 일 때,

$$\|f(x) - \hat{f}(x)\| < \gamma \|x\|$$

을 만족하는  $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재한다.

**증명:** (3), (4)로부터  $\tilde{f} := f - h$ 을 정의하자, 여기서  $h = [\mu_1 x_3 \ 0 \ 0 \ \mu_2 x_4 + \mu_2 x_5]^T$ . 이 때, 모든  $x \in \mathbb{B}_x$ 와  $\eta_0 \in \mathbb{R}_{>0}$ 대해 서  $x_1 + V_e \neq 0$ 라면 함수  $\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x}$ 는 다음과 같이 유계(boundedness)됨을 알 수 있다:

$$\left\| \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \right\|_{\infty} \leq \eta_0 = \max\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$$

따라서  $\tilde{f}$ 는 립시츠(Lipshitz) 함수이며,  $\|\tilde{f}(x)\| \leq L \|x\|$ 를 만족하는  $L \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ 은 항상 존재한다. 결론적으로,  $\gamma \in \mathbb{R}_{\geq L + \eta_0}$ 에 대해서

$$\begin{aligned} \|f(x) - \hat{f}(x)\| &= \left\| \tilde{f}(x) - \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \Big|_{x=0} x \right\| \\ &\leq \|\tilde{f}(x)\| + \left\| \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \Big|_{x=0} x \right\| \\ &\leq (L + \eta_0) \|x\| \\ &\leq \gamma \|x\| \end{aligned}$$

을 만족함을 알 수 있다. ■

문제 1에서 제시한 제어기 설계 문제는 다음과 같은 선형행렬 부등식(LMI)으로 구성된 볼록(convex) 최적화(optimization) 문제로 변환될 수 있다:

**정리 1** 비선형 수중글라이더 (3)과 퍼지 제어기

$$u = \sum_{i=1}^{32} \theta_i K_i x \tag{6}$$

를 고려하자. 이 때, 선형행렬부등식

$$\tilde{P} A_i^T + \tilde{K}_i^T B_i^T + A_i \tilde{P} + B_i \tilde{K}_i < 0, \quad \forall i \in \mathbb{I}_{32} \tag{7}$$

$$\tilde{P} A_i^T + \tilde{K}_j^T B_i^T + A_i \tilde{P} + B_i \tilde{K}_j + \tilde{P} A_j^T + \tilde{K}_i^T B_j^T + A_j \tilde{P} + B_j \tilde{K}_i < 0, \quad \forall (i, j) \in \mathbb{I}_{32} \times \mathbb{I}_{32}, i < j \tag{8}$$

을 만족하는  $\tilde{P} = \tilde{P}^T > 0$ 와  $\tilde{K}_i$ 가 존재한다면

- i. 페루프 시스템 (5), (6)은 전역적으로(globally) 점근적(asymptotically) 안정하다;
- ii.  $x \in \mathbb{B}_x$ 일 때, 페루프 시스템 (3), (6)은 국소적으로(locally) 점근적(asymptotically) 안정하다.

선형행렬부등식 (7), (8)의 가능해(feasible solution)가 존재하면  $K_i = \tilde{K}_i \tilde{P}^{-1}$ 이다.

**증명 :** 리아프노브 함수

$$V = x^T P x$$

을 고려하자, 여기서  $P = P^T > 0$ 이다. 페루프 시스템 (5), (6)의  $x$ 에 따른  $V$ 의 미분계수(derivative)는

$$\begin{aligned} \dot{V}|_{(4),(6)} &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} \theta_i \theta_j x^T (A_i + B_i K_j)^T P + P (A_i + B_i K_j) x \end{aligned}$$

이 된다. 따라서  $\theta_i \in \mathbb{R}_{(0,1]}$ ,  $P^{-1}$ 기반 합동변환(con transformation) 및 정의의  $\tilde{P} = P^{-1}$ 와  $\tilde{K}_i := K_i P^{-1}$ 를 이용하여, 모든  $x \in \mathbb{R}^n / \{0\}$ 에 대해서

$$\begin{aligned} \dot{V}|_{(4),(6)} < 0 &\Leftrightarrow (A_i + B_i K_j)^T P + P (A_i + B_i K_j) < 0, \quad \forall (i, j) \in \mathbb{I}_{32} \times \mathbb{I}_{32} \\ &\Leftrightarrow \text{LMI (7), (8)} \end{aligned}$$

이 만족함을 알 수 있다. 결국, 리아프노브(Lyapunov) 안정도 기준에 의해서 선형행렬부등식(LMI) (7), (8)이 만족하는 해가 존재

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \sup_{x \in B_x} \left\{ \left| -\frac{2}{m} (K_{D_0} + K_D (x_4 + \alpha_e)^2) (x_1 + V_e) \right| + \left| \frac{m_0 g}{m} \right| + \left| -\frac{2}{m} K_D (x_4 + \alpha_e) (x_1 + V_e) \right|^2 \right\} \\ \eta_2 &= \sup_{x \in B_x} \left\{ \left| \frac{(x_3 + m_0) g}{m (x_1 + V_e)^2} \right| + \left| \frac{K_{L_0} + K_L (x_4 + \alpha_e)}{m} \right| + \left| \frac{(x_3 + m_0) g}{m (x_1 + V_e)} \right| + \left| \frac{g}{m (x_1 + V_e)} \right| + \left| \frac{K_L}{m} (x_1 + V_e) \right| \right\} \\ \eta_3 &= \eta_2 + \left| \frac{K_M}{K_q} \right| \end{aligned}$$

한다면, 페루프 시스템 (5), (6)은 전역적으로(globally) 점근적(asymptotically) 안정하다.

제어기 (6)에 의한 실제 비선형 수중글라이더 (3)의 안정화(stabilization)를 알아보기 위해 페루프 시스템 (3), (6)의  $x$ 에 따른  $V$ 의 미분계수(derivative)는

$$\begin{aligned} \dot{V}|_{(2),(6)} &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= \left( f(x) + g(x) \sum_{i=1}^{32} \theta_i K_i x \right)^T P x + x^T P \left( f(x) + g(x) \sum_{i=1}^{32} \theta_i K_i x \right) \\ &= \left( \hat{f}(x)x + g(x) \sum_{i=1}^{32} \theta_i K_i x \right)^T P x + x^T P \left( f(x) + g(x) \sum_{i=1}^{32} \theta_i K_i x \right) \\ &\quad + (f(x) - \hat{f}(x)x)^T P x + x^T P (f(x) - \hat{f}(x)x) \end{aligned}$$

이다.  $x \in \mathbb{B}_x$  일 때, 명제 2 및 보조 정리 1에 의해

$$\dot{V}|_{(2),(6)} \leq \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=1}^{32} \theta_i \theta_j x^T ((A_i + B_i K_j)^T P + P(A_i + B_i K_j)) + 2\gamma \|P\| \|x\|^2$$

이 된다. 이때, 선형행렬부등식(LMI) (7), (8)이 유효하다면

$$(A_i + B_i K_j)^T P + P(A_i + B_i K_j) < -Q$$

을 만족하는  $Q = Q^T > 0$ 은 항상 존재하기 때문에

$$\dot{V}|_{(2),(6)} \leq -(\lambda_{\min}(Q)x - 2\gamma\|P\|)\|x\|^2$$

을 알 수 있다. 결국,  $\gamma < \frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q)/\|P\| \Rightarrow \dot{V}|_{(2),(6)} < 0$ 을 보일 수 있다. 결론적으로,  $x \in \mathbb{B}_x$  일 때, 페루프 시스템 (3), (6)의 점근적 안정도(asymptotic stability)는 국소적으로 보장된다. ■

#### 4. 시뮬레이션

제안된 설계 기법의 검증을 위해 표 1에 제시된 파라미터를 가

표 1 수중글라이더 파라미터 [7]

Table 1 Parameters in the underwater glider.

| 파라미터      | 값   |
|-----------|-----|
| $g$       | 9.8 |
| $m$       | 30  |
| $\delta$  | 0.3 |
| $J_2$     | 0.1 |
| $K_{L_0}$ | 0   |
| $K_L$     | 300 |
| $K_q$     | -5  |
| $K_{D_0}$ | 10  |
| $K_D$     | 100 |
| $K_{M_0}$ | 2   |
| $K_M$     | -50 |

지는 수중 글라이더 (1)를 고려하자. 목표는 수중글라이더 (1)의 점근적 안정화 퍼지 제어기 (6)을 설계하는 것이다.  $|x_1| \leq 0.9$ ,  $|x_2| \leq \pi/2$ ,  $|x_4| \leq \pi/2$ 라 가정할 때, 퍼지 시스템 (5)를 얻을 수 있다, 여기서  $\hat{a}_{11} = 0.5008$ ,  $\hat{a}_{12} = 0.4992$ ,  $\hat{a}_{21} = 0$ ,  $\hat{a}_{22} = 1$ ,  $b_{11} = 0.8371$ ,  $b_{12} = 0.1629$ ,  $b_{21} = 0.8692$ ,  $b_{22} = 0.1308$ ,  $b_{31} = 1$ ,  $b_{32} = 0$ . 이 때, 정리 1에서 선형행렬부등식(LMI) (7), (8)의 가능해(feasible solution)가 존재하며, 다음의  $P$ 와 부록 B에서 제시된 제어이득  $K_i$ ,  $i \in I_{32}$ 를 얻을 수 있다:

$$P = \begin{bmatrix} 0.4001 & 0.1586 & -0.0043 & 0.2078 & -0.3055 \\ 0.1586 & 0.2722 & 0.0065 & -0.0767 & 0.3929 \\ -0.0043 & 0.0065 & 0.0866 & 1.3825 & 1.5644 \\ 0.2078 & -0.0767 & 1.3825 & 81.0428 & 75.5352 \\ -0.3055 & 0.3929 & 1.5644 & 75.5352 & 87.3576 \end{bmatrix}$$

그림 2-8은 명제 2에 제시된 퍼지 모델 (5)를 기반으로 설계된 제어기 (6)에 대한 실제 비선형 수중글라이더 (1)의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 때, 초기치는  $x_0 = [0.70 \ 0 \ 2.8 \ 0.0175 \ 0]^T$

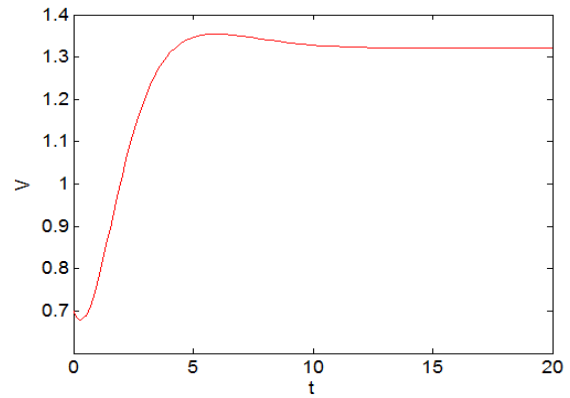


그림 2  $V$ 의 시간응답  
Fig. 2 Time response of  $V$

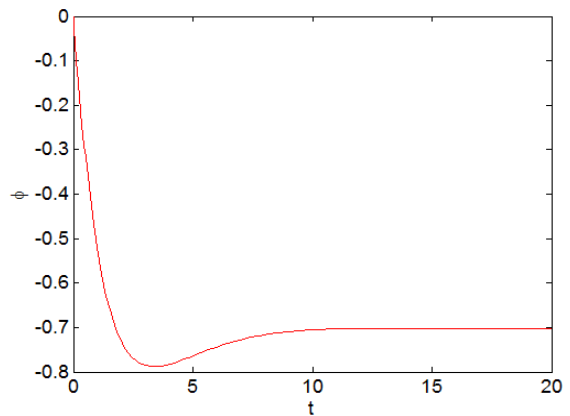


그림 3  $\phi$ 의 시간응답  
Fig. 3 Time response of  $\phi$

이며, 평형점은  $V_e = 1.3210$ ,  $\phi_e = -0.7026$ ,  $m_0 = 2.800$ ,  $\alpha_e = 0.0400$ ,  $\Omega_2 = 0$  이다. 그림 2-6은 수중글라이더의 경로방향 속도( $V$ ), 경로각( $\phi$ ), 부력조절기에 따라 조절 가능값( $m_0$ ), 받

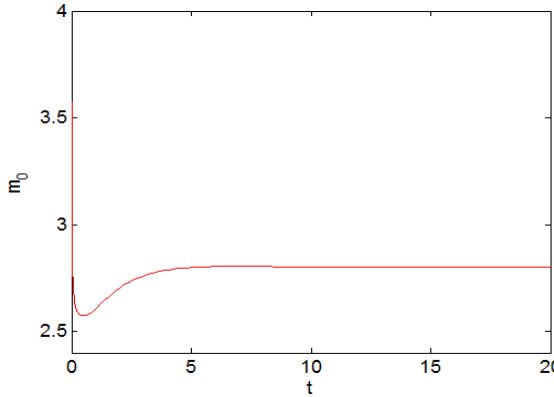


그림 4  $m_0$ 의 시간응답  
Fig. 4 Time response of  $m_0$

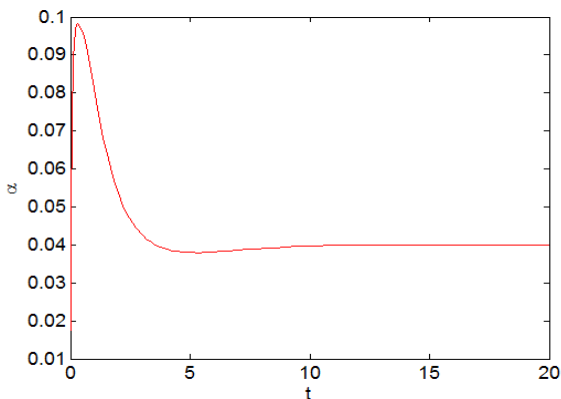


그림 5  $\alpha$ 의 시간응답  
Fig. 5 Time response of  $\alpha$

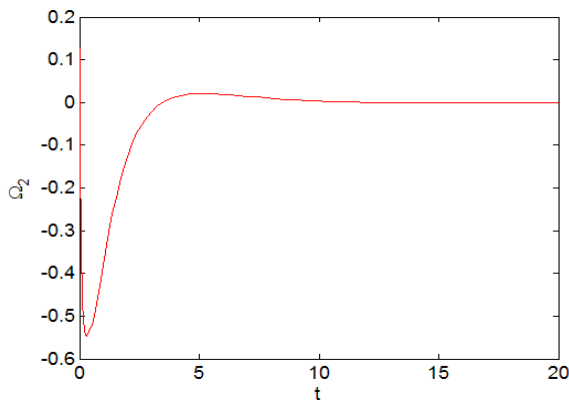


그림 6  $\Omega_2$ 의 시간응답  
Fig. 6 Time response of  $\Omega_2$

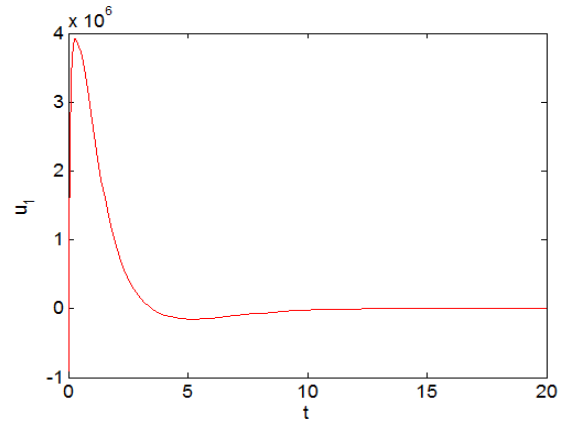


그림 7 제어 입력  $u_1$   
Fig. 7 Control inputs  $u_1$

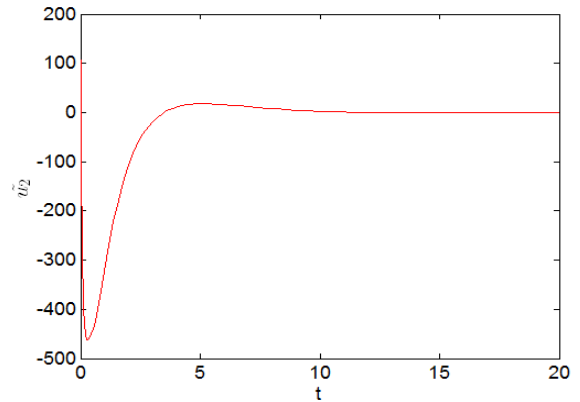


그림 8 제어 입력  $\tilde{u}_2$   
Fig. 8 Control inputs  $\tilde{u}_2$

음각( $\alpha$ ),  $e_2$ 방향의 각속도( $\Omega_2$ )의 시간응답을 각각 보여준다. 제안된 부력 및 모멘트 제어기 (6)에 의해 비선형 수중글라이더 (1)의 궤적은 시간이 지남에 따라 평형점( $V_e, \phi_e, m_0, \alpha_e, \Omega_2$ )으로 점근적으로 수렴함을 알 수 있다. 그림 7, 8에서는  $u_1$ 는 부력 제어입력,  $\tilde{u}_2$ 는 모멘트 제어 입력에 대한 시간응답을 나타내며 0으로 수렴함을 알 수 있다. 결론적으로, 정리 1에서 주장한 것처럼 제안된 제어기 (6)은 퍼지 모델 (5)가 점근적 안정화되도록 설계되었지만 실제 비선형 수중글라이더 (1)의 점근적 안정도(asymptotic stability) 또한 보장한다.

## 5. 결 론

본 논문은 T-S 퍼지 모델을 이용한 비선형 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어 설계하였다. 수중글라이더의 동역학 모델링은 승강타와 부력 변화에 의한 힘-모멘트 상호작용을 고려하여

표현된다. 부분 선형화와 부채꼴 비선형성을 이용하여 수중글라이더 동역학은 T-S 퍼지 모델로 표현된다. 유도된 T-S 퍼지 모델은 비선형 시스템의 점근적 안정화 조건은 리아프노브 함수를 이용하여 선형행렬부등식(LMI) 형태로 도출하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기 설계 기법의 우수성과 제시된 이론적 정리를 검증하였다.

**부 록 A**

수중글라이더의 퍼지 모델 (5)에서  $\theta_i, A_i, B_i, i \in I_{32}$ 는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_2 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, & \theta_3 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, \\ \theta_4 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, & \theta_5 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_6 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, \\ \theta_7 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, & \theta_8 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, & \theta_9 &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, \\ \theta_{10} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{11} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{12} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, \\ \theta_{13} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{14} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{15} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, \\ \theta_{16} &= \hat{\theta}_{11}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{17} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{18} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, \\ \theta_{19} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{20} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{21} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, \\ \theta_{22} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{23} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{24} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{21}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, \\ \theta_{25} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{26} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{27} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, \\ \theta_{28} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{31}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52}, & \theta_{29} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{30} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{41}\hat{\theta}_{52}, \\ \theta_{31} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{51}, & \theta_{32} &= \hat{\theta}_{12}\hat{\theta}_{22}\hat{\theta}_{32}\hat{\theta}_{42}\hat{\theta}_{52} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{11} &= \frac{\mu_1 - \hat{a}_{12}}{\hat{a}_{11} - \hat{a}_{12}}, & \hat{\theta}_{12} &= 1 - \hat{\theta}_{11}, & \hat{\theta}_{21} &= \frac{\mu_2 - \hat{a}_{22}}{\hat{a}_{21} - \hat{a}_{22}}, & \hat{\theta}_{22} &= 1 - \hat{\theta}_{21}, \\ \hat{\theta}_{31} &= \frac{g_1 - \hat{a}_{32}}{\hat{a}_{31} - \hat{a}_{32}}, & \hat{\theta}_{32} &= 1 - \hat{\theta}_{31}, & \hat{\theta}_{41} &= \frac{g_2 - \hat{a}_{42}}{\hat{a}_{41} - \hat{a}_{42}}, & \hat{\theta}_{42} &= 1 - \hat{\theta}_{41}, \\ \hat{\theta}_{51} &= \frac{g_3 - \hat{a}_{52}}{\hat{a}_{51} - \hat{a}_{52}}, & \hat{\theta}_{52} &= 1 - \hat{\theta}_{51} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = A_6 = A_7 = A_8 := \hat{A}_{11}, \\ A_9 &= A_{10} = A_{11} = A_{12} = A_{13} = A_{14} = A_{15} = A_{16} := \hat{A}_{12}, \\ A_{17} &= A_{18} = A_{19} = A_{20} = A_{21} = A_{22} = A_{23} = A_{24} := \hat{A}_{21}, \\ A_{25} &= A_{26} = A_{27} = A_{28} = A_{29} = A_{30} = A_{31} = A_{32} := \hat{A}_{22}, \\ B_1 &= B_9 = B_{17} = B_{25} := \hat{B}_{111}, & B_2 &= B_{10} = B_{18} = B_{26} := \hat{B}_{112}, \\ B_3 &= B_{11} = B_{19} = B_{27} := \hat{B}_{121}, & B_4 &= B_{12} = B_{20} = B_{28} := \hat{B}_{122}, \\ B_5 &= B_{13} = B_{21} = B_{29} := \hat{B}_{211}, & B_6 &= B_{14} = B_{22} = B_{30} := \hat{B}_{212}, \\ B_7 &= B_{15} = B_{23} = B_{31} := \hat{B}_{221}, & B_8 &= B_{16} = B_{24} = B_{32} := \hat{B}_{222} \end{aligned}$$

여기서

$$\hat{A}_{i_1 i_2} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \hat{a}_{1i_1} & a_3 & 0 \\ a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_4 - a_5 - a_6 & -a_7 & K_M/K_q & & \\ 0 & 0 & 0 & \hat{a}_{2i_2} & \hat{a}_{2i_2} \end{bmatrix}, \quad \hat{B}_{i_1 i_2} = \begin{bmatrix} 0 & b_{1i_3} \\ 0 & b_{2i_4} \\ 1 & 0 \\ 0 & -b_{2i_4} \\ 0 & b_{3i_5} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_{11} \sup_{x \in B_x} \mu_1, & \hat{a}_{12} = \inf_{x \in B_x} \mu_1, \\ \hat{a}_{21} = \sup_{x \in B_x} \mu_2, & \hat{a}_{22} = \inf_{x \in B_x} \mu_2 \\ b_{11} = \sup_{x \in B_x} g_1, & b_{12} = \inf_{x \in B_x} g_1, \\ b_{21} = \sup_{x \in B_x} g_2, & b_{22} = \inf_{x \in B_x} g_2, \\ b_{31} = \sup_{x \in B_x} g_3, & b_{32} = \inf_{x \in B_x} g_3. \end{aligned}$$

**부 록 B**

$$\begin{aligned} K_1 &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0074 & -0.0295 & -1.4234 & -1.6441 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ K_2 &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0052 & -0.0089 & -0.0374 & -1.8197 & -2.0839 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\ K_3 &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0074 & -0.0295 & -1.4237 & -1.6444 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ K_4 &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0052 & -0.0089 & -0.0375 & -1.8226 & -2.0866 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\ K_5 &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0074 & -0.0295 & -1.4234 & -1.6441 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ K_6 &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0052 & -0.0089 & -0.0374 & -1.8196 & -2.0840 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\ K_7 &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0073 & -0.0295 & -1.4237 & -1.6444 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ K_8 &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0052 & -0.0089 & -0.0375 & -1.8226 & -2.0867 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\ K_9 &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0073 & -0.0096 & -0.0384 & -1.8569 & -2.1454 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\ K_{10} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0227 & -0.0315 & -0.1272 & -6.1544 & -7.0971 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\ K_{11} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0073 & -0.0096 & -0.0384 & -1.8572 & -2.1457 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\ K_{12} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0227 & -0.0315 & -0.1273 & -6.1573 & -7.0998 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\ K_{13} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0073 & -0.0096 & -0.0384 & -1.8569 & -2.1454 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\ K_{14} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0228 & -0.0315 & -0.1272 & -6.1544 & -7.0971 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\ K_{15} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0073 & -0.0096 & -0.0384 & -1.8572 & -2.1457 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\ K_{16} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0228 & -0.0315 & -0.1273 & -6.1573 & -7.0998 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\ K_{17} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0060 & -0.0072 & -0.0295 & -1.4232 & -1.6445 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\ K_{18} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0097 & -0.0072 & -0.0375 & -1.8173 & -2.0874 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0008 & -0.0007 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{19} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0060 & -0.0072 & -0.0295 & -1.4235 & -1.6447 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\
 K_{20} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0097 & -0.0072 & -0.0375 & -1.8203 & -2.0901 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\
 K_{21} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0060 & -0.0072 & -0.0295 & -1.4232 & -1.6445 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\
 K_{22} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0097 & -0.0072 & -0.0375 & -1.8173 & -2.0874 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0008 & -0.0007 \end{bmatrix} \\
 K_{23} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0060 & -0.0072 & -0.0295 & -1.4235 & -1.6447 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \\
 K_{24} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0097 & -0.0071 & -0.0375 & -1.8202 & -2.0901 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0007 & -0.0007 \end{bmatrix} \\
 K_{25} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0077 & -0.0094 & -0.0384 & -1.8566 & -2.1458 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\
 K_{26} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0272 & -0.0297 & -0.1273 & -6.1521 & -7.1005 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\
 K_{27} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0077 & -0.0094 & -0.0384 & -1.8569 & -2.1461 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\
 K_{28} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0272 & -0.0297 & -0.1273 & -6.1550 & -7.1032 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\
 K_{29} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0077 & -0.0094 & -0.0384 & -1.8566 & -2.1458 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\
 K_{30} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0272 & -0.0297 & -0.1273 & -6.1520 & -7.1005 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix} \\
 K_{31} &= 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0077 & -0.0094 & -0.0384 & -1.8569 & -2.1461 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0002 \end{bmatrix} \\
 K_{32} &= 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0272 & -0.0297 & -0.1273 & -6.1550 & -7.1032 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0012 & 0.0013 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

**감사의 글**

이 논문은 2014년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

**References**

[1] B. T. Curtin, M. D. Crimmins, J. Curcio, M. Benjamin, C. Roper, "Autonomous underwater vehicles: trends and transformations," Marine Technology Society Journal, vol. 39, no.3 pp. 65-75, 2005.

[2] S. C. Jee, J. H. Moon, and H. J. Lee, "Stabilization of underwater glider by torque control: feedback linearization approach," The Institute of Electronics Engineers of Korea Conference, pp. 1358-1360, 2014.

[3] S. C. Jee, H. J. Lee, M. H. Kim, and J. H. Moon, "Stabilization of underwater glider by buoyancy and moment control : feedback linearization approach," Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 28 no. 6, pp. 546-551, 2014.

[4] J. H. Moon, S. C. Jee, and H. J. Lee, "Stabilization of underwater glider by observer-based buoyancy and moment control," Information and Control Symposium, pp. 224-227, 2014.

[5] J. H. Moon, H. J. Lee, "Underwater glider model-based sampled-data controller design and stability analysis," The Korean Society of Mechanical Engineers conference, pp. 2859-2862, 2015.

[6] Bhatta, Pradeep, and Naomi Ehrlich Leonard, "Nonlinear gliding stability and control for vehicles with hydrodynamic forcing," Automatica, vol. 44 no. 5, pp. 1240-1250, 2008.

[7] F. Zhang, X. Tan, and HK. Khalil, "Passivity-based controller design for stablization of underwater glider." American Control Conference(ACC), IEEE, pp. 5408-5413, 2012.

[8] M. J. Kim, M. G. Joo, "Depth control of an underwater glider by using PID controller," Journal of Korean Institute of Information Technology, vol. 13 no. 4 pp. 1-7, 2015.

[9] Y. Yang, Y. Wang, Z. Ma, S. Wang. "A thermal engine for underwater glider driven by ocean thermal energy." Applied Thermal Engineering pp. 455-464, 2016.

[10] I. Khalid, and M. R. Arshad. "Modeling and motion control of a hybrid-driven underwater glider." Indian Journal of Geo-Marine Sciences, vol. 42 no.8 pp. 971-979, 2013

[11] I. Khalid, M. R. Arshad, and S. Ishak, "A hybrid-driven underwater glider model, hydrodynamics estimation, and an analysis of the motion control." Ocean Engineering vol. 81 pp. 111-129, 2014.

[12] S. W. Jun, D. W. Kim, H. J. Lee, "Design of T-S Fuzzy-Model-Based Controller for Control of Autonomous Underwater Vehicles," Korean Institute of Intelligent Systems Transactions, vol. 21 no. 3, pp. 302-306, 2011.

[13] K. Tanaka, and H. O. Wang, Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach, John Wiley & Sons, 2004.

[14] H. K. Khalil, Nonlinear Control., Upper Saddle River, NJ:Prentice, 1996.

[15] P. Bhatta, Nonlinear Stability and Control of Gliding Vehicles, Ph.D. thesis, Princeton University, 2006.

[16] D. W. Kim, "Tracking of REMUS autonomous underwater vehicles with actuator saturations," Automatica, vol. 58, pp. 15-21, 2015.

[17] D. W. Kim, H. J. Lee, and M. Tomizuka, "Fuzzy stabilization of nonlinear systems under sampled-data feedback: an exact discrete-time model approach," IEEE Trans. Fuzzy Sys., pp. 251-260, vol. 18, no. 2, 2010.



## 저 자 소 개



### 이 경 학 (Gyeonghak Lee)

현재 한밭대학교 전기공학과 학사과정  
관심분야 : T-S 퍼지 시스템, 퍼지 모델링,  
수중글라이더  
Phone : 042-821-1834  
E-mail : mi101183@hanbat.ac.kr



### 김 도 완 (Do Wan Kim)

2002년: 연세대학교 기계전자공학부(공학사)  
2004년: 연세대학교대학원 전기전자공학과  
(공학석사)  
2007년: 동 대학원 전기전자공학과(공학박사)  
2008년: University of California, Berkeley  
박사 후 과정  
2009년: 연세대학교 전기전자공학과 BK연구  
교수  
2010년~ 현재: 국립한밭대학교 전기공학과  
부교수  
관심분야 : 비선형 디지털 제어, 자율주행  
제어, 지능 제어, 디지털 재설계.  
Phone : 042-821-1097  
Fax : 042-821-1088  
E-mail : dowankim@hanbat.ac.kr