

수중운동체 입수 초기의 불안정 거동에 대한 제어기 설계 및 성능평가

박영일*, 류동기*, 김삼수*, 이만형**

Design and Performance Evaluation of Controller for Unstable Motion of Underwater Vehicle after Water Entry

Yeong Il Park*, Dong Ki Ryu*, Sam Soo Kim* Man Hyung Lee**

ABSTRACT

This paper describes a design and performance evaluation of robust controller which overrides unstable motion and pulls out quickly after water entry of underwater vehicle dropped from aircraft or surface ship. We use 6-DOF equation for model of motions and assume parameter uncertainty to reflect the difference of real motion from modelled motion equation. We represent a nonlinear system with uncertainty as Takagi and Sugeno's(T-S) fuzzy models and design controller stabilizing them. The fuzzy controller utilizes the concept of so-called parallel distributed compensation (PDC). Finally, we confirm stability and performance of the controller through computer simulation and hardware in the loop simulation (HILS).

Key Words : Underwater Vehicle(수중운동체), 6-DOF Equation(6자유도방정식), Pull Out(수평추행), Parameter Uncertainty(매개변수 불확실성), Fuzzy Controller(퍼지제어기), HILS(하드웨어를 이용한 폐회로 시뮬레이션)

1. 서론

항공기나 수상함에서 발사되는 수중운동체는 입수 초기의 불안정한 자세 때문에 수면위로 떠오르거나 바닥에 충돌할 위험성이 있으므로 입수후 짧은 시간 안에 수평추행(pull-out) 상태가 되도록 하는 운동제어기 개발이 필수적이다.

이러한 운동제어기를 설계하기 위한 운동 모델링은 속도 및 각속도 벡터를 상태 변수로 하는 6자유도 비선형 운동방정식과 기타 보조 방정식으로

표현된다⁽¹⁾. 운동방정식으로부터 기존의 제어기 설계 기법은 운동체가 일정한 속도로 운동하고, 연성항들의 영향이 작다는 가정하에 선형화된 단일입출력(Single Input Single Output: SISO) 시스템으로 분리 모델링하여 PID 제어기 설계 기법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 그러나 본 논문에서 다루는 수중운동체의 운동특성은 수면 입수 과정, 해수유입에 의한 추진력 생성 과정 같은 복잡한 절차들로 인하여 속도 및 자세값들이 가변적이어서 선형화 시키기에는 무리가 있고, 연성항들의 영향이 크게

* 국방과학연구소

** 부산대학교 기계공학부

발생하므로 다중입출력(Multi Input Multi Output: MIMO) 시스템으로 모델링 하여야 한다. 또한 입수 후 수평주행까지의 운동특성이 매우 복잡하고, 비선형적인 요소들이 많으므로 모델링된 운동방정식과 실제의 운동특성과는 상당한 차이가 유발되며, 이러한 요소들을 불확실성이라 한다. 따라서 수중운동체의 입수후 불안정한 운동상태로부터 빠르고, 안정적으로 수평주행상태로 만들기 위해서는 불확실성을 가지는 비선형 MIMO 시스템에 대해 견실 안정성을 보장하는 제어기 설계가 필요하다.

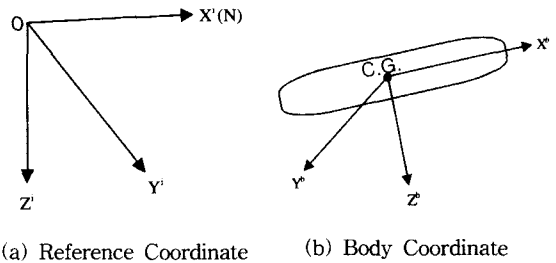
최근에 Wang 등⁽²⁾은 변형한 T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지 모델로 표현된 비선형 시스템을 안정화 시키는 제어기를 병렬분산보상(Parallel Distributed Compensation: PDC) 개념과 선형 행렬 부등식(Linear Matrix Inequalities: LMI)을 이용하여 설계하였다^(3,4,5). 또한 불확실성을 가지는 비선형 시스템을 안정화하는 견실 퍼지 제어기와 견실 안정화 조건이 Tanaka 등⁽⁶⁾에 의해서 제시되었으며, 정 등^(7,8)은 불확실성을 가지는 비선형 연속시간 및 이산시간 시스템에 대해 극점배치 문제를 고려한 견실 퍼지 제어기 설계 기법과 안정화 조건을 제시하였다.

본 논문에서는 입수후 불안정한 거동 현상을 보이는 수중운동체를 빠르고, 안정적으로 수평주행 상태로 만들기 위해 입수후 수평주행 상태까지의 운동특성을 불확실성을 가지는 비선형 MIMO 시스템으로 모델링한다. 모델링된 시스템을 변형한 T-S 퍼지 모델로 변환하고, 정 등⁽⁸⁾이 제안한 극점배치를 고려한 견실퍼지 제어기 설계 기법을 이용하여 페루프 시스템을 안정화하는 조건을 만족하는 상태 궤환 제어기를 설계한다. 이때의 퍼지 제어기는 PDC 개념을 이용하여 구성된다. 더불어 제어기의 성능을 위해서 극점배치 문제를 고려하여 제어기를 설계한다. 시뮬레이션을 통해 제어기의 기본적인 성능검증을 수행하고 제어기의 하드웨어 구현성능과 실시간 처리 능력을 HILS(Hardware In the Loop Simulation)를 통해 검증한다.

2. 6자유도 운동방정식

일반적으로 수중운동체의 위치 및 자세를 나타내는 운동을 표시하기 위해서는 동체좌표계와 기준좌표계를 정의해야 하며, 운동방정식은 동체좌표계에서 운동량의 시간 변화가 동유체력이나 복원력 등의 외력과 같다는 Newton의 제2법칙을 적용하여

표현된다. 먼저, 좌표계에 대하여 살펴보면 설계하고자 하는 수중운동체의 동체좌표계는 운동체의 무게중심을 원점으로 하여 진행방향의 중심 축을 X_b 축으로 정의하고, 제어판을 기준으로 하여 오른쪽으로 X_b 축에 직각인 축을 Y_b 로, 아래로 직각인 축을 Z_b 라 정의하는 직각 우수 좌표계이다. 기준좌표계는 진북을 X_i 축이라 하고, Z_i 축은 지구중심을 향하며 Y_i 축은 우수계 정의에 따라 구성된다. 수중운동체의 두 좌표계는 Fig. 1과 같다.



(a) Reference Coordinate (b) Body Coordinate

Fig. 1 Coordinate Systems

설정된 좌표계들에서 수중운동체는 강체(rigid body)이고 질량이 불변이며, 추진력에 의한 회전도 오르는 없으며, 몸체가 물에 완전히 잠겨있다고 하면, 운동방정식은 유체역학적인 힘과 모멘트와 추진력, 중력 및 부력에 의한 힘과 모멘트의 합으로써 표시된다. 즉, 6자유도를 가지는 수중운동체의 운동방정식은 식 (1)과 같이 10개의 상태변수를 가진 비선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} + qw - rv) &= X_u \dot{u} + X_u u - (W - B) \sin \theta + X_T \\
 m(\dot{v} + ru - pw) &= Y_v \dot{v} + Y_v \dot{p} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_{\delta_r} \delta_r \\
 &\quad + (W - B) \sin \phi \cos \theta \\
 m(\dot{w} + pv - qu) &= Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} + Z_w w + Z_{\delta_e} \delta_e \\
 &\quad + (W - B) \cos \phi \cos \theta \\
 I_x \dot{p} &= K_v \dot{v} + K_p \dot{p} + K_r \dot{r} + K_v v + K_p p + K_r r \\
 &\quad + K_{\delta_r} \delta_r + K_{\delta_e} (\delta_{er} - \delta_{el}) \\
 &\quad - Y_B B \cos \phi \cos \theta + Z_B B \sin \phi \cos \theta \\
 I_y \dot{q} &= M_w \dot{w} + M_q \dot{q} + M_w w + M_q q + M_{\delta_e} \delta_e \\
 &\quad + X_B B \cos \phi \cos \theta + Z_B B \sin \theta \\
 I_z \dot{r} &= N_v \dot{v} + N_p \dot{p} + N_r \dot{r} + N_v v + N_p p + N_r r \\
 &\quad + N_{\delta_r} \delta_r - X_B B \sin \phi \cos \theta - Y_B B \sin \theta \\
 \dot{\phi} &= p + \sin \phi \tan \theta q + \cos \phi \tan \theta r \\
 \dot{\theta} &= \cos \phi q - \sin \phi r \\
 \dot{\psi} &= \sin \phi \sec \theta q + \cos \phi \sec \theta r \\
 \dot{z} &= -\sin \theta u + \sin \phi \cos \theta v + \cos \phi \cos \theta w
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 m 은 질량, XT 는 추진력, u, v, w 는 동체좌표계에서의 속도, p, q, r 은 동체좌표계에서의 각속도, ϕ, θ, Ψ 는 기준좌표계에 대한 동체좌표계의 오일러각, W, B 는 각각 기준좌표계에서의 중력과 부력, I_x, I_y, I_z 는 관성행렬, XB, YB, ZB 는 동체좌표계에서의 부력중심 위치, 하첨자 X, Y, Z, K, M, N 는 유체역학적 계수들이고, $\delta r, \delta el, \delta er$ 는 방향타, 좌·우 승강타각이며, δe 는 좌·우 승강타각의 평균값을 나타낸다.

3 수중운동체의 건설 퍼지 제어기 설계

3.1 건설 퍼지 제어 이론

T-S 퍼지 모델은 비선형 시스템을 모델링 하는데 효과적인 방법으로 잘 알려져 있다. T-S 퍼지 모델은 비선형 시스템의 지역(local) 입출력 관계식으로 나타내는 IF-THEN 규칙들로 표현한다. 이 절에서는 파라미터 불확실성을 가지는 변형된 T-S 퍼지 모델로 표현된 비선형 시스템을 고려한다.

플랜트 규칙 i :

IF $x_1(t)$ is M_{i1} and ... and $x_n(t)$ is M_{in}
THEN

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(t))x(t) + (B_i + \Delta B_i(t))u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2)$$

여기서 M_{ij} 는 퍼지 집합이고, $x(t) \in R^n$ 는 상태, $u(t) \in R^m$ 는 입력, r 은 IF-THEN 규칙의 수, A_i 와 B_i 는 적절한 차원을 가지는 상수 행렬이다. 그리고 고 파라미터 불확실성 행렬은

$$[\Delta A_i(t) \ \Delta B_i(t)] = H_i F_i(t) [E_A, E_B], \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다고 가정한다. 여기서 $F(t) = \{F(t)^*F(t) \leq I, F(t)$ 의 요소들은 Lebesgue 측정가능}, $H_i, E_A, E_B, i = 1, 2, \dots, r$ 는 적절한 차원을 가지는 기지의 상수행렬이고, $F_i(t) \in \Omega, i = 1, 2, \dots, r$ 는 크기가 제한된 미지의 행렬 함수이다. 주어진 $(x(t), u(t))$ 에 대해서,

T-S 퍼지 모델은 식(4)와 같이 퍼지 모델의 출력으로 $\dot{x}(t)$ 를 추론한다

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(x(t)) \{(A_i + \Delta A_i(t))x(t) + (B_i + \Delta B_i(t))u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(x(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) \{(A_i + \Delta A_i(t))x(t) + (B_i + \Delta B_i(t))u(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} w_i(x(t)) &= \prod_{j=1}^n M_{ij}(x_j(t)) \\ h_i(x(t)) &= \frac{w_i(x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(x(t))} \\ x(t) &= [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

이고, $M_{ij}(x_j(t))$ 는 멤버쉽 함수 M_{ij} 에서 $x_j(t)$ 의 소속 정도이다. 하중함수 $w_i(x(t))$ 는 모든 i 에 대하여

$$\begin{aligned} w_i(x(t)) &\geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ \sum_{i=1}^r w_i(x(t)) &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

을 만족한다고 가정하므로 정규화된 하중함수 $h_i(x(t))$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} h_i(x(t)) &\geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

모든 $i = 1, 2, \dots, r$ 에 대해서 (A_i, B_i) 는 제어 가능(Controllable)이라 가정한다. T-S 퍼지 시스템을 안정화하는 건설 퍼지 제어기로

제어기 규칙 i :

IF $x_1(t)$ is M_{i1} and ... and $x_n(t)$ is M_{in}
THEN $u(t) = K_i x(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (8)$

와 같이 묘사된 상태제환 제어기를 고려한다. 이러한 퍼지 제어기의 PDC 개념에 따라 최종 출력은

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(x(t)) K_i x(t) \quad (9)$$

이다. 퍼지 시스템 식 (4)에 퍼지 제어기 식 (9)을 적용했을 때, 폐루프 시스템은 다음 식과 같다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(x(t)) h_j(x(t)) \{ (A_i + \Delta A_i(t)) + (B_i + \Delta B_i(t)) K_j \} x(t) \quad (10)$$

따라서 견실 퍼지 제어기 설계 문제는 식 (10) 을 안정화하는 제어기 K_j 를 찾는 문제로 귀결된다.

파라미터 불확실성을 가지는 T-S 퍼지 시스템을 안정화하는 제어기 설계 기법은 정리로 요약된다⁽⁷⁾.

정리 : 파라미터 불확실성을 가지는 퍼지 시스템 식 (2)를 고려한다.

$$\begin{bmatrix} S_{ij} & QE_{A_i}^T + V_j^T E_{B_i}^T \\ E_{A_i} Q + E_{B_i} V_j & -\lambda_{ij} I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$$\forall i, j = 1, 2, \dots, r$$

을 만족하는 양한정 행렬 Q , 행렬 $V_j (j=1, 2, \dots, r)$, 양수 $\lambda_{ij} (i, j=1, 2, \dots, r)$ 가 존재하면, 불확실성을 가지는 T-S 퍼지 모델로 표현된 비선형 시스템을 안정화하는 퍼지 제어기 식 (9)가 존재한다. 여기서

$$S_{ij} = QA_i^T + A_i Q + V_j^T B_i^T + B_i V_j + \lambda_{ij} H_i H_i^T \quad i, j = 1, 2, \dots, r \quad (12)$$

$$Q = P^{-1}, \quad (13)$$

$$V_j = K_j Q \quad j=1, 2, \dots, r \quad (14)$$

이다. 퍼지 제어기의 상태궤환 이득들은 식 (14)로부터 얻을 수 있다.

견실 퍼지 제어기의 성능 요구 사양을 만족시키기 위해 극점배치 조건을 가지는 견실 퍼지 제어기 설계 문제를 고려한다. 퍼지 페루프 시스템 식 (10)의 안정성을 보장할 뿐만 아니라 각 페루프 시스템의 극점을 원하는 영역에 배치하는 퍼지 제어기가 존재하기 위해서는 모든 $i=1, 2, \dots, r$ 에 대해서 식 (11)과

$$[l_{pq} Q + n_{pq} (A_i Q + B_i V_j) + n_{pq} (QA_i^T + V_j^T B_i^T)]_{1 \leq p, q \leq k} < 0 \quad (15)$$

을 동시에 만족하는 양한정 행렬 Q , 행렬 $V_j (i=1, 2, \dots, r)$, 양수 $\lambda_{ij} (i, j=1, 2, \dots, r)$ 가 존재하면 된다.

3.2 수중운동체의 견실 퍼지 제어기 설계

수중운동체의 초기 운동 과정을 세밀하게 구분하면 항공기나 헬기에서 발사후 공기중 운동 과정, 입수 과정, 해수 전지의 활성화 및 추진 전동기 작동 과정으로 구분할 수 있다. 실제로 구동타에 의해 제어력이 발생하는 단계는 추진 전동기 작동 과정으로 이때의 운동 특성이 제어기의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 안정적인 수평주행을 위해서는 추진 전동기 작동 단계의 운동 특성을 고려하여 운동제어기의 설계가 필요하다.

추진 전동기 작동 과정에서는 요오 방향의 회전 운동은 하지 않으므로, 속도 v 성분과 회전 각속도 p, r 성분은 매우 작다. 따라서 비선형 운동방정식 (1)에서 pv, rv 성분을 무시할 수 있다. 식 (1)을 T-S 퍼지 모델로 변환하기 위해 비선형 성분들을 고찰하면 속도와 각속도의 결합된 성분들과 자세각들의 삼각함수 형태들이다. 롤각(ϕ)을 0° 라 가정하고, 낙하산의 부력과 입수시의 속도를 고려하여 추진력이 생성되는 과정에서의 퍼지와 속도의 운동 범위를

$$\theta = [-\pi/3 \ 0] \text{ (rad)}, \quad V = [V_L \ V_H] \text{ (kts)} \quad (16)$$

과 같이 가정하면, 식 (16)의 범위내인 작동점 $V=V_f$ 와 $\theta=\theta_f$ 에서 비선형항들을 Taylor 급수전개를 통해 식 (6)을 식 (17), (18)과 같이 수직면 및 수평면으로 분리하여 선형화 할 수 있다. 식 (16)에서 $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 이다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= X_u u - m V_f \sin \theta_f q \\ &\quad - (W - B) \cos \theta_f \theta \\ (m - Z_w) \dot{w} &= Z_q \dot{q} + Z_w w + (Z_q + m V_f \cos \theta_f) q \\ &\quad - (W - B) \sin \theta_f \theta + Z_{\delta_e} \delta_e \end{aligned} \quad (17)$$

$$(I_y - M_q) \dot{q} = M_w \dot{w} + M_w w + M_q q + Z_B B \cos \theta_f \theta - X_B B \sin \theta_f \theta + M_{\delta_e} \delta_e$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= q \\ \dot{z} &= -\sin \theta_f u + \cos \theta_f w - V_f \theta \end{aligned}$$

$$(m - Y_v) \dot{v} = Y_p \dot{p} + Y_r \dot{r} + Y_v v + (Y_p + m V_f \sin \theta_f) p + (Y_r - m V_f \cos \theta_f) r + (W - B) \cos \theta_f \phi + Y_{\delta_r} \delta_r$$

$$(I_x - K_p) \dot{p} = K_p \dot{v} + K_r \dot{r} + K_i v + K_p p + K_r r + Z_B B \cos \theta_f \phi + K_{\delta_r} \delta_r + K_{\delta_e} (\delta_{er} - \delta_{el})$$

$$(I_z - N_r) \dot{r} = N_v \dot{v} + N_p \dot{p} + N_v v + N_p p + N_r r - X_B B \cos \theta_f \phi + N_{\delta_r} \delta_r$$

$$\begin{aligned} \phi &= p + \tan \theta r \\ \dot{\phi} &= \sec \theta \dot{r} \end{aligned} \quad (18)$$

입수후 수평주행까지의 물리적 운동특성과 모델링된 운동방정식 사이에서 발생하는 오차를 제거 설계에 반영하기 위해 유체역학적 계수들에 Table 1과 같은 불확실성 요소들이 존재한다고 가정한다.

Table 1 Uncertainty of Hydrodynamic Coefficients

불확실성 계수	오차 변화량	불확실성 계수	오차 변화량
$Y_{\dot{p}}$	$\pm 10\%$	Y_p	$\pm 10\%$
$Z_{\dot{q}}$	$\pm 10\%$	Z_q	$\pm 10\%$
$K_{\dot{p}}$	$\pm 50\%$	K_p	$\pm 50\%$
$K_{\dot{\delta}_r}$	$\pm 50\%$	K_{δ_r}	$\pm 50\%$
$M_{\dot{q}}$	$\pm 10\%$	M_q	$\pm 10\%$
$N_{\dot{p}}$	$\pm 10\%$	N_p	$\pm 10\%$

이러한 불확실성을 가지는 비선형 운동방정식을 식 (16)과 같은 피치와 속도의 운동 범위 내에서 다음과 같은 T-S 퍼지 모델로 나타낼 수 있다.

플랜트 규칙 i ($i = 1, 2, 3, 4$)

IF V is M_{i1} and θ is M_{i2}

THEN

$$\dot{x}_v = (A_{vi} + \Delta A_{vi}(t))x_v(t) + (B_{vi} + \Delta B_{vi}(t))u_v(t)$$

$$\dot{x}_h = (A_{hi} + \Delta A_{hi}(t))x_h(t) + (B_{hi} + \Delta B_{hi}(t))u_h(t)$$

여기서 $x_v = [u \ w \ q \ \theta \ z]^T$, $x_h = [v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T$ 와 같이 설정하고, 이때의 상태 방정식의 행렬과 불확실성들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{v1} &= \begin{bmatrix} -0.6 & 0 & 4.4 & -1.5 & 0 \\ 0 & -5.1 & -3.5 & 1.6 & 0 \\ 0 & 5.7 & -14.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.5 & 0 & -5.1 & 0 \end{bmatrix}, B_{v1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -25.7 \\ -47.8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ A_{v2} &= \begin{bmatrix} -0.6 & 0 & 0 & -3.1 & 0 \\ 0 & -5.1 & -1.9 & 0 & 0 \\ 0 & 5.7 & -14.4 & -0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & -5.1 & 0 \end{bmatrix}, B_{v2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -25.7 \\ -47.8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$A_{v3} = \begin{bmatrix} -0.6 & 0 & 19.6 & -1.5 & 0 \\ 0 & -5.1 & 1.9 & 1.6 & 0 \\ 0 & 5.7 & -14.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ -1.3 & -0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{v3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -25.7 \\ -47.8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{v4} = \begin{bmatrix} -0.6 & 0 & 0 & -3.1 & 0 \\ 0 & -5.1 & 9.1 & 0.0 & 0 \\ 0 & 5.7 & -14.4 & -0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & -23.1 & 0 \end{bmatrix}, B_{v4} = \begin{bmatrix} 0 \\ -25.7 \\ -47.8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{h1} = \begin{bmatrix} -5.0 & -2.7 & 3.8 & -0.8 & 0 \\ -0.7 & -9.4 & 1.1 & 1.0 & 0 \\ -5.8 & -0.09 & -14.1 & 0.3 & 0 \\ 0 & 1.0 & -1.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{h1} = \begin{bmatrix} 25.6 & 0.4 \\ 271.7 & -142.1 \\ -47.4 & -0.01 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{h2} = \begin{bmatrix} -5.0 & -0.01 & 2.2 & 1.9 & 0 \\ -0.7 & -9.7 & 1.3 & -2.6 & 0 \\ -5.8 & -0.0 & -14.4 & -0.7 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{h2} = \begin{bmatrix} 25.6 & 0.4 \\ 271.7 & -142.1 \\ -47.4 & -0.01 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{h3} = \begin{bmatrix} -5.0 & -12.4 & -1.7 & -0.8 & 0 \\ -0.7 & -8.2 & 1.8 & 1.0 & 0 \\ -5.8 & -0.2 & -14.4 & 0.3 & 0 \\ 0 & 1.0 & -1.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{h3} = \begin{bmatrix} 25.6 & 0.4 \\ 271.7 & -142.1 \\ -47.4 & -0.01 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{h4} = \begin{bmatrix} -5.0 & -0.01 & -8.9 & 1.9 & 0 \\ -0.7 & -9.7 & 2.6 & -2.6 & 0 \\ -5.8 & -0.0 & -14.5 & -0.7 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{h4} = \begin{bmatrix} 25.6 & 0.4 \\ 271.7 & -142.1 \\ -47.4 & -0.01 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} [\Delta A_{vi} \ \Delta B_{vi}] &= H_{vi} F_{vi}(t) [E_{A_{vi}} \ E_{B_{vi}}] \quad i=1, 2, 3, 4 \\ [\Delta A_{hi} \ \Delta B_{hi}] &= H_{hi} F_{hi}(t) [E_{A_{hi}} \ E_{B_{hi}}] \quad i=1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

$$H_{vi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.012 \\ 0 & 0 & 1 & 1.519 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, E_{B_{vi}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$E_{A_{vi}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0.511 & 0 & 0 \\ 0 & 0.183 & 1.906 & 0.0011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$H_{hi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.1922 & 0.1655 \\ 0 & 1 & 0 & 71.5262 & 61.7467 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0046 & 0.0039 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, E_{B_{hi}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2 & 0 \\ 0 & 1.2 \end{bmatrix}$$

$$E_{A_{hi}} = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0.0093 & 0.0007 & 0.0007 & 0 \\ 0.0167 & 5.0805 & 0.0563 & 0.0557 & 0 \\ 0 & 0.0054 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$F_i(t) \in \Omega, \quad i=1, 2, 3, 4$$

T-S 퍼지 모델에서 퍼지 집합을

$$\begin{aligned} M_{11}(V) &= M_{21}(V) = 1 - \frac{(V-5.144)^2}{423.37} \\ M_{31}(V) &= M_{41}(V) = \frac{(V-5.144)^2}{423.37} \\ M_{12}(\theta) &= M_{32}(\theta) = -\frac{3}{\pi} \theta \\ M_{22}(\theta) &= M_{42}(\theta) = 1 + \frac{3}{\pi} \theta \end{aligned} \quad (19)$$

와 같이 정의한다. 앞에서 선형화된 운동방정식들은 $V=V_L, V_H$ (kts)와 $\theta=\pi/3, 0$ (rad)인 각각의 경우에서 선형화 시켰다.

더불어 제어기의 성능을 위해서 극배치 문제를 고려한다. 원점을 중심으로 하고 각이 $\pi/3$ 인 원뿔 영역과 $-10 < \text{Re}(z) < -0.05$ 인 영역의 교집합 내에 각 부시스템의 극점을 배치하고자 한다면 선형 행렬 부등식 영역은

$$\begin{bmatrix} \sin(\pi/3) & -\cos(\pi/3) \\ \cos(\pi/3) & \sin(\pi/3) \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} \sin(\pi/3) & -\cos(\pi/3) \\ \cos(\pi/3) & \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \bar{z} < 0, \quad (20)$$

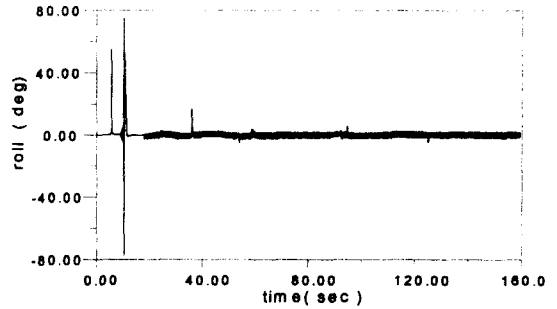
$$\begin{bmatrix} -20 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{z} < 0$$

으로 주어진다. 불확실성을 가진 비선형 시스템을 안정하게 하고, 식 (20)을 만족하는 $\lambda_{h_i}, Q_{h_i}, V_{h_i}$ 를 구하여 식 (14)로부터 제어기의 상태이득 이득 K_{h_i} 를 구한다.

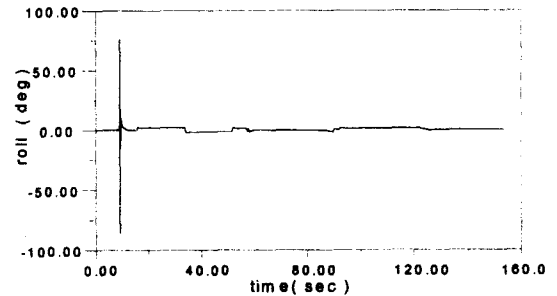
4. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 분석

본 절에서는 설계된 제어기의 보다 세밀한 성능 분석을 위해서 비선형 운동방정식과 여러 부체계들의 모델을 이용하여 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 기존의 PID 제어기와 건설 퍼지 제어기의 성능을 비교 분석 해본다.

시뮬레이션 상황은 항공기 발사 환경을 모사하였다. 발사시점에서의 초기 고도는 100m이고, 초기 속력은 50m/sec이며 자세각은 0으로 하였다. 공기 중 운동 모델에 의한 입수각은 -40.0° , 입수속도는 52.0m/s이고, 입수후 운동 모델에 의한 피치각은 -95.0° , 속도는 1.5m/s, 심도는 15.0m 이었다. 초기 입력장치 설정값으로 설정 심도는 50m, 설정 침로는 -30° 로 하였으며 주행 시간은 180초로 하였다. 유체역학적 계수들의 불확실성은 Table 1을 기준으로 오차변화량을 상수로 정하였고, 이때의 시뮬레이션 결과들은 Fig. 2에서 Fig. 6까지이다.

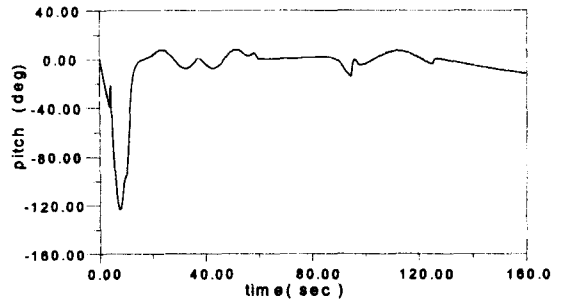


(a) PID Controller

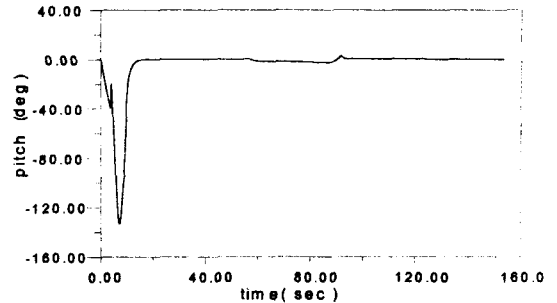


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 2 Roll Angle with Uncertainty

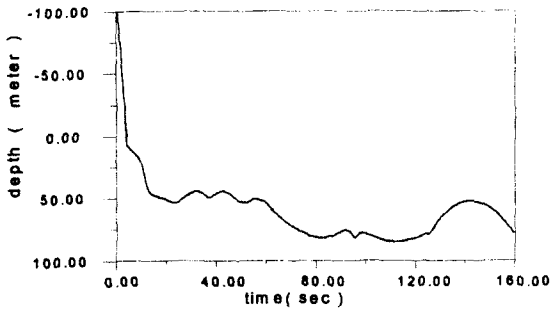


(a) PID Controller

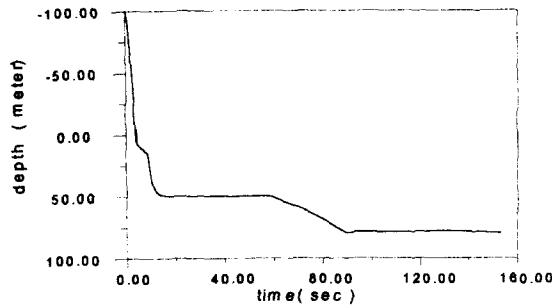


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 3 Pitch Angle with Uncertainty

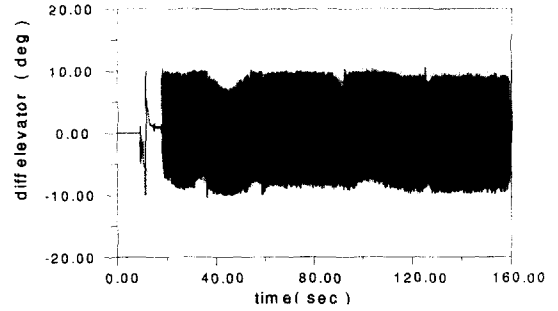


(a) PID Controller

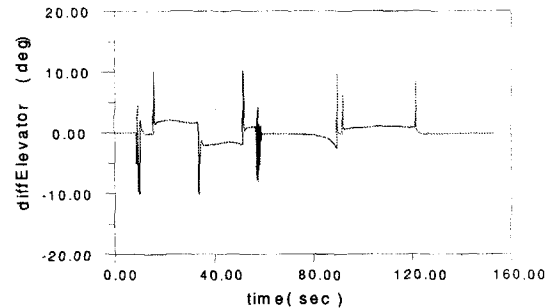


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 4 Depth with Uncertainty

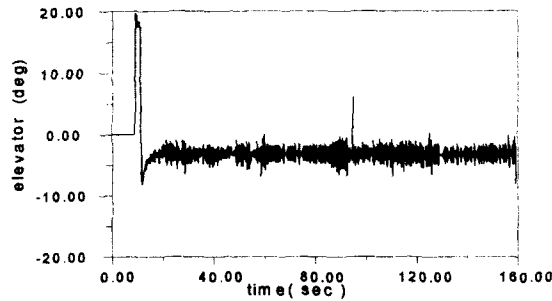


(a) PID Controller

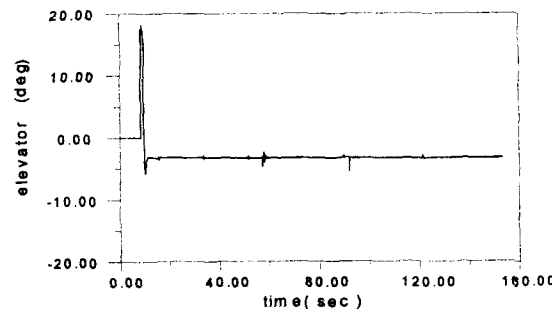


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 6 Difference Angle between Right and Left Elevator with Uncertainty



(a) PID Controller



(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 5 Average Elevator Angle with Uncertainty

수직면 운동인 피치(Fig. 3), 심도(Fig. 4)와 제어 입력인 승강타각(Fig. 5)에서 보듯이 PID 제어기는 초기 불안정한 운동상태에서 불확실성 요소들에 의한 영향으로 수평주행 성능이 매우 불안정하게 되나 견실 퍼지 제어기는 안정된 수평주행 성능을 보여준다. 또한 롤(Fig. 2) 및 롤타각(Fig. 6)에서 보듯이 PID 제어기는 불확실성 요소들의 영향으로 롤 방향에 진동이 발생하는 불안한 운동 특성을 보였으나 견실 퍼지 제어기는 안정적인 운동 특성을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과, 초기 불안한 거동에 의한 외란 요소들이나 모델링 과정에서 발생하는 모델링 오차와 같은 불확실성 요소들이 존재할 경우에는 PID 제어기 보다 견실 퍼지 제어기가 보다 안정적인 성능을 보였다. 따라서 공기중에서 발사되는 수중운동체의 안정적인 수평주행을 위한 제어기 설계 기법으로 기존의 PID 제어기 설계 기법은 한계가 있는 것으로 판단되며, 견실 퍼지 제어기 설계 기법과 같은 불확실성 요소들과 속도 변화와 자세 변화와 같은 비선형성을 고려한 제어기 설계 기법이 적합할 것으로 판단된다.

5. HILS에 의한 분석

본 절에서는 설계된 견실 퍼지 제어기의 하드웨어 구현 성능과 실시간 처리 성능을 검증하기 위해 실시간 HILS를 수행하고, 견실 퍼지 제어기와 PID 제어기의 시뮬레이션 결과들을 비교 분석한다.

HILS를 위한 장비는 전산기, 운동재현장치(Flight Motion Simulator: FMS), 전지 시뮬레이터 및 음향신호 시뮬레이터 그리고 초기 입력장치로 구성되어 있다. 전산기에서는 수중운동체와 표적의 운동방정식을 계산하고, HILS의 관장 및 각 보조장치와의 통신을 담당하고, 운동재현장치는 수중운동체의 회전운동을 재현하며, 전지 시뮬레이터는 운동체에 소요되는 전원을 발사절차에 따라 인가해주고, 음향신호 시뮬레이터는 수중운동체에 표적신호를 모사하여 인가하는 기능을 갖는다. 또한 초기 입력장치는 수중운동체의 발사절차에 따라 초기 입력 및 발사 기능을 갖는다.

HILS의 소프트웨어의 흐름은 Fig. 7과 같다. 관성측정장치는 수중운동체의 각속도와 가속도를 감지하고, 자세기준장치는 감지된 각속도와 가속도를 이용하여 자세 변화율, 자세각, 속도 및 위치를 계산하여 유도제어 컴퓨터로 보낸다. 유도제어 컴퓨터내의 자동조종장치는 항법값을 받아 제어 명령 추종을 위한 타각 명령을 계산하고, 작동기는 타각 명령에 따라 타를 구동한다. 측정된 구동타각을 입력받아 운동방정식을 계산하고, 계산된 각속도로 FMS를 구동함으로써 10msec의 계산주기를 갖는 페루프를 구성한다.

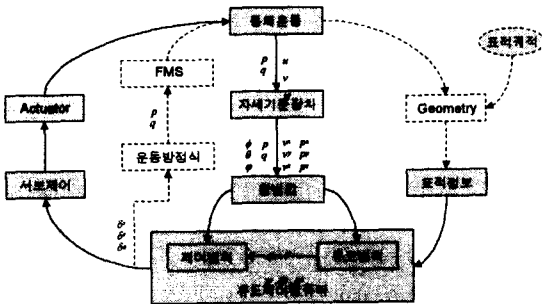
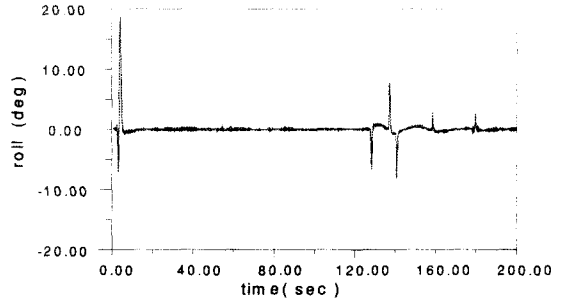


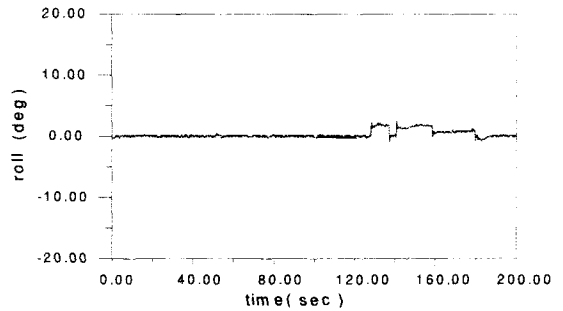
Fig. 7 Flow Chart of HILS Software

시뮬레이션 상황은 수상함 발사 환경을 모사하였다. 초기 고도는 5m이고, 초기 속력은 30m/sec, 자세각은 0으로 하였다. 설정 심도는 40m, 설정 침

로는 0°로 하였으며 주행 시간은 180초로 하였다.

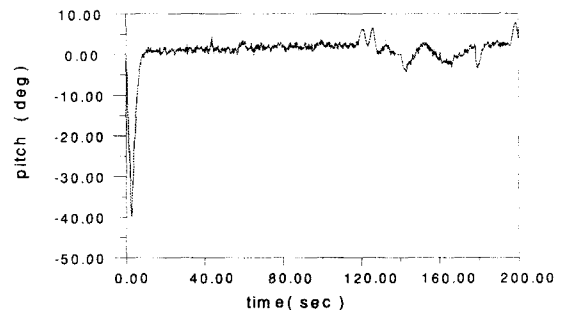


(a) PID Controller

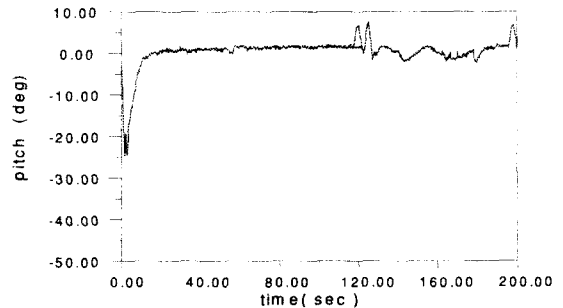


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 8 Roll Angle in HILS

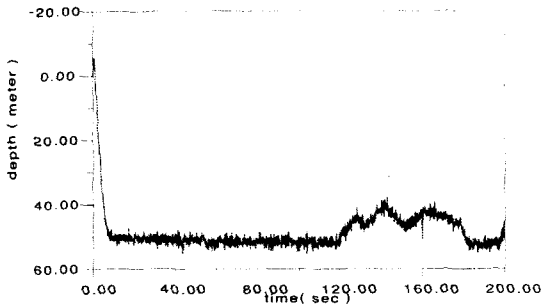


(a) PID Controller

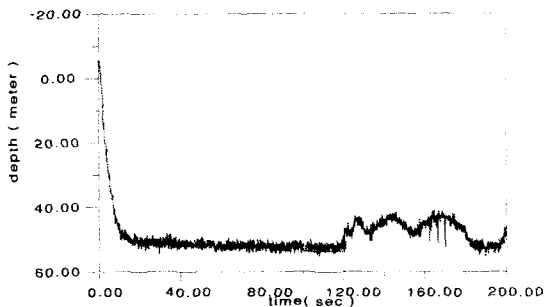


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 9 Pitch Angle in HILS

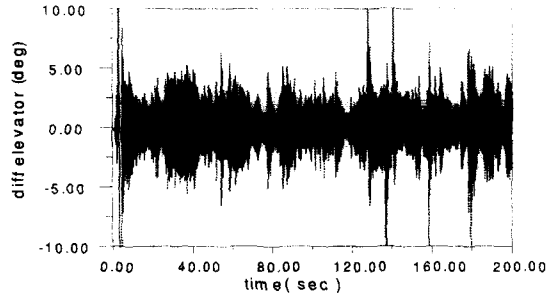


(a) PID Controller

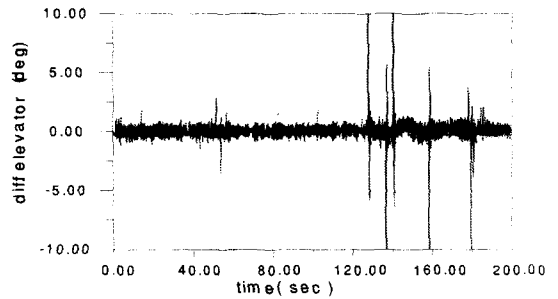


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 10 Depth in HILS

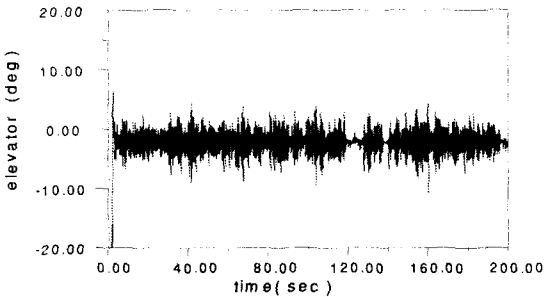


(a) PID Controller

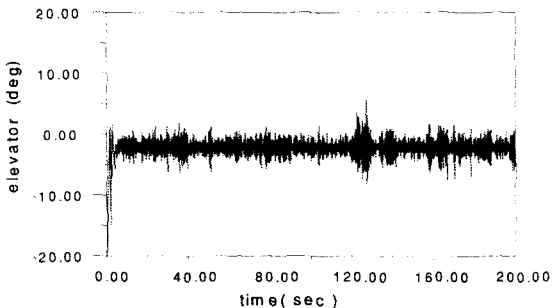


(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 12 Difference Angle between Right and Left Elevator in HILS



(a) PID Controller



(b) Robust Fuzzy Controller

Fig. 11 Average Elevator Angle in HILS

수평주행 운동특성을 나타내는 피치(Fig. 9), 심도(Fig. 10) 및 승강타각(Fig. 11)의 비교에서 전체적인 성능은 비슷하게 나타났지만 초기 입수시의 운동특성이 건설 피치 제어가 안정적인 성능을 보여줌을 알 수 있다. 또한 롤(Fig. 8) 및 롤타각(Fig. 12)에서 보듯이 PID 제어기보다 건설 피치 제어가 다소 안정적인 성능을 보여줌을 알 수 있고, 특히 초기 운동상태에서 PID 제어기는 큰 진동이 생겼지만 건설 피치 제어기는 안정적인 초기 운동상태를 보여줌을 알 수 있었다. 이러한 현상이 발생하는 이유로는 비행 재현 시뮬레이터인 FMS의 동특성이 모델링된 운동방정식의 운동특성을 완전하게 재현하지 못하고, 어뢰의 운동을 측정하는 관성측정장치의 실질적인 오차 요인, 구동장치에서 발생할 수 있는 구동기의 시간지연 및 구성부간의 통신상에서 발생할 수 있는 시간지연 등과 같은 불확실성 요소들의 복합적인 영향 때문인 것으로 판단된다.

HILS 수행결과로부터 건설 피치 제어기의 하드웨어 구현 성능과 실시간 처리 성능을 검증하였고, 더불어 하드웨어적으로 발생할 수 있는 불확실성

요소들에 대해 PID 제어기보다 보다 견실한 특성을 보임을 알 수 있었다.

HILS를 수행하기 위한 프로그램은 주전산기에서는 COSIM 언어와 COSINT Tool 및 SIMPLOT Tool을 사용하였으며, 운용상태의 도시를 위해서 C 언어와 OBJECT PASCAL 및 DELPHI Tool을 사용하였다.

6. 결론

본 논문에서는 발사후 불안정한 상태에서 거동하는 수중운동체에 대해 안정적인 수평주행과 원하는 유도제어 성능을 보장하는 견실 퍼지 제어기 설계 방법에 대해 연구하였다. 수중운동체의 발사 환경은 공중에서 투하되어 공기중에서 물속으로 입수하는 과정과 입수후 추진전지가 활성화되는 과정, 추진전동기가 작동되는 복잡한 과정을 가지고 있어서 수중운동체가 수평주행에 도달하기까지의 운동 특성은 매우 불확실적이고 비선형적인 요소들이 많다. 이로 인하여 모델링된 운동방정식은 실제 운동 특성과 상이한 차이를 유발하게 되고, 또한 초기상태의 불안정한 자세에 의해 연성항들의 영향이 운동방정식에 크게 작용하게 되므로 제어기 설계에 사용할 운동방정식을 불확실성 요소들이 포함된 비선형 MIMO 시스템으로 모델링 하였다. 이러한 불확실성 요소들을 갖는 비선형 MIMO 시스템에 대해 IF-THEN 규칙을 적용하여 불확실성을 갖는 T-S 퍼지 모델로 모델링 하였고, 불확실성을 갖는 T-S 퍼지 모델이 안정하기 위한 충분조건과 성능을 고려한 극점배치 문제를 동시에 만족하는 상태궤환 제어기를 설계하였다.

설계된 견실 퍼지 제어기의 성능 분석을 위하여 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 불확실성이 있는 경우와 없는 경우에 대해 견실 퍼지 제어기와 PID 제어기의 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과, 불확실성이 없을 경우에는 두 제어기가 모두 양호한 수평비행 성능과 유도제어 성능을 보였으나, 불확실성이 있는 경우에는 PID 제어기의 수평비행 성능이 불안정하게 되고, 롤 방향 운동은 불안한 진동을 보였지만, 견실 퍼지 제어기의 성능에는 별 영향이 없는 것으로 나타나 견실 퍼지 제어기의 안정적인 수평비행 성능과 원하는 유도제어 성능이 검증되었다.

또한 설계된 견실 퍼지 제어기의 하드웨어 구현

성능과 실시간 처리능력을 HILS를 통해 검증하여 그 적용성을 확인하였다.

참고문헌

1. 안창범, 김찬기, "수중운동체의 운동방정식과 좌표계(II)," NWS-519-971654, 국방과학연구소, 1997.
2. H. O. Wang, K. Tanaka and M. F. Griffin, "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 4, no. 1, pp. 14-23, Feb. 1996.
3. S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnam, Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, SIAM, 1994.
4. M. Chiali and P. Gabinet, "H ∞ design with pole placement constrains: An LMI approach," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 41, no. 3, pp. 358-367, 1996.
5. E. T. Jeug, D. C. oh, J. H. Kim and H. B. Park, "Robust controller design for uncertain systems with time delays: LMI approach," Automatica, vol. 32, no. 8, pp. 1229-1231, 1996.
6. K. Tanaka, T. Ikada and H. O. Wang, "Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : Quadratic stabilizability, H ∞ control theory, and linear matrix inequalities," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, Feb. 1996.
7. 정은태, 권성하, 조중선, "불확실성을 가지는 비선형 시스템의 견실 퍼지 제어기 설계," 한국퍼지 및 지능 시스템 학회 논문지, vol. 8, no. 3, pp. 26-32, 1998.
8. J. Joh, E. T. Jeung, W. J. Chung and S. H. Kwon, "A new design method for T-S fuzzy controller with pole placement constraints," J. Fuzzy Logic and Intelligent Systems, vol. 7, no. 3, pp. 72-80, Aug. 1997.