

무인 수중운동체의 H_∞ 심도 및 방향 제어기 설계

양 승 윤*

(2000년 1월 29일 접수)

H_∞ Depth and Course Controllers Design for Autonomous Underwater Vehicles

Seung Yun Yang

Key Words: Autonomous Underwater Vehicles(무인 수중운동체), Depth Control(심도제어), Course Control(방향제어), H_∞ Servo Control(H_∞ 서보제어)

Abstract

In this paper, H_∞ depth and course controllers of autonomous underwater vehicles using H_∞ servo control are proposed. An H_∞ servo problem is formulated to design the controllers satisfying a robust tracking property with modeling errors and disturbances. The solution of the H_∞ servo problem is as follows: first, this problem is modified as an H_∞ control problem for the generalized plant that includes a reference input mode, and then a sub-optimal solution that satisfies a given performance criteria is calculated by LMI(Linear Matrix Inequality) approach. The H_∞ depth and course controllers are designed to satisfy the robust stability about the modeling error generated from the perturbation of the hydrodynamic coefficients and the robust tracking property under disturbances(wave force, wave moment, tide). The performances(the robustness to the uncertainties, depth and course tracking properties) of the designed controllers are evaluated with computer simulations, and finally these simulation results show the usefulness and applicability of the proposed H_∞ depth and course control systems.

1. 서론

무인 수중운동체(autonomous underwater vehicles)의 가장 중요한 기능은 임무 실행동안 인간의 간섭없이 수중운동체가 임무를 자율적으로 수행할 수 있도록 하는 것이다. 무인 수중운동체에는 정찰, 조사, 기만 등의 주어진 임무를 자율적으로 수행하기 위하여 임무계획, 경로 생성/추적, 자동 조종장치(autopilot), 항법장치, 장애물 회피장치 등으로 구성되는 자율제어 시스템이 요구된다. 이 중에서도 자동 심도제어기와 자동 방향제어기로 구성되는 자동조종장치는 무인 수중운동체의

자율제어에 있어서 매우 중요한 기능을 가진다.

무인 수중운동체가 수면근처에서 저속으로 항해하는 경우, 해상에서 발생하는 파도와 조류 등에 큰 영향을 받게된다. 또한, 무인 수중운동체의 운동특성은 제어판에 비하여 몸체가 크고, 운항속도가 느려 제어력이 약하기 때문에 운동체의 외부형상에 지배적인 영향을 받는다. 특히, 외부형상의 상하 비대칭으로 인한 유체역학적인 특성 때문에 연직면 운동에서 특히 복잡한 연성효과와 강한 비선형 특성을 나타낸다. 따라서, 무인 수중운동체의 자동 심도 및 방향제어를 위해서는 모델링오차나 파도와 조류 등의 외란에 대하여 견실한 성능을 만족하는 제어기 설계가 필수적으로 요구된다.

견실제어(robust control)는 모델링오차, 외란 등으로 야기되는 불확실성을 주파수역 가중함수로 근사화하여 평가함수에 포함시킴으로써 정량적으

* 국방과학연구소 2체계-수중탐지부

E-mail : syyang@sunam.kreonet.re.kr

TEL : (055)540-6224 FAX : (055)542-3737

로 불확실성을 고려하는 제어기 설계법⁽¹⁾으로서, 현재 다수의 응용을 통하여 그 유용성이 확인되고 있다. Martin 등⁽²⁾은 견실안정성을 만족하는 제어기 설계를 위하여 LQG/LTR 방식에 기초를 둔 자동조종장치를 개발하였고, Williams 등⁽³⁾은 견실 H_∞ 제어기법을 이용하여 수중운동체의 다변수 심도제어기를 설계하였다. Healey 등⁽⁴⁾은 가변구조제어에 기초한 다변수 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 견실한 성능을 가지는 무인 수중운동체의 심도 및 방향제어기를 제안하였으며, 최근에 Liceaga-Castro 등⁽⁵⁾은 파도 외란에 대하여 수면근처에서 저속 항해하는 수중운동체의 심도 제어기를 μ -합성법을 적용하여 설계하였다.

본 논문에서는 모델식의 비선형성, 유체계수의 불확실한 변동 등으로 인한 모델링오차가 존재하여도 견실안정성을 보장하고, 파도와 조류 등의 외란이 존재하여도 주어진 항해궤도를 견실하게 추종하도록 하는 무인 수중운동체의 H_∞ 심도 및 방향제어기를 설계하였다. 무인 수중운동체의 심도와 방향에 대한 견실한 명령추종성능을 만족하는 제어기 설계를 위하여, 본 논문에서는 H_∞ 서보문제⁽⁶⁾를 정식화하고 이로부터 H_∞ 서보제어기를 설계하였다. 여기서, H_∞ 서보제어기 설계를 위하여 설정된 플랜트의 일반화 플랜트를 명령입력모드를 포함하는 수정된 일반화 플랜트로 재구성함으로써 H_∞ 서보문제를 H_∞ 제어문제로 전개하였다. 수정된 일반화 플랜트는 H_∞ 제어문제에서 요구되는 표준가정⁽⁷⁾을 만족하지 않으므로 LMI에 기초한 해법⁽⁸⁾을 바탕으로 H_∞ 제어문제의 해를 구하였고, 이 해를 바탕으로 H_∞ 서보제어기를 재구성하였다. 설계된 제어기는 수중운동체의 6 자유도 비선형모델식으로 구성된 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가 분석하였다.

2. 무인 수중운동체의 운동방정식

무인 수중운동체(Fig. 1)의 운동방정식은 운동체에 작용하는 힘과 모멘트의 관계식으로부터 유도되는 서지(surge) x , 스웨이(sway) y , 히브(heave) z , 롤(roll) ϕ , 피치(pitch) θ , 요(yaw) ψ 의 6 자유도 비선형 운동방정식으로 주어진다.⁽⁹⁾ 제어시스템의 설계를 위해서는 단순화된 선형 운동방정식이 필요하며, 6자유도 비선형 운동방정식에서 다음과 같은 가정을 설정하여 무인 수중

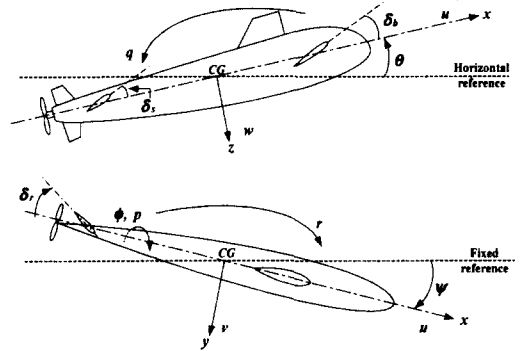


Fig. 1 The coordinate systems of an autonomous underwater vehicle

운동체의 선형 운동방정식을 유도할 수 있다.

- (1) 전진방향 속도 u 는 일정하다.
- (2) 롤각 ϕ 는 매우 작은 것으로 가정한다.
- (3) 관성상승적은 무시될 수 있다.
- (4) 수중운동체가 수중에서는 중성부력 상태를 유지한다.

위 가정으로부터 수중운동체의 6자유도 운동은 연직면운동과 수평면운동으로 분리된다. 설정된 가정을 6자유도 비선형 운동방정식에 적용시키면 식 (1)과 (2)로 주어지는 연직면에서의 선형 운동방정식을 유도할 수 있다.

• 히브 방정식

$$m\dot{w} - umq = \frac{1}{2} \rho l^3 Z_q \dot{q} + \frac{1}{2} \rho l^3 (Z_w \dot{w} + Z_q uq) + \frac{1}{2} \rho l^2 (Z_w u w + u^2 (Z_{\delta_s} \delta_s + Z_{\delta_b} \delta_b)) \quad (1)$$

• 피치 방정식

$$I_y \dot{q} = \frac{1}{2} \rho l^3 M_q \dot{q} + \frac{1}{2} \rho l^3 (M_q uq + M_w \dot{w}) + \frac{1}{2} \rho l^3 (M_w u w + u^2 (M_{\delta_s} \delta_s + M_{\delta_b} \delta_b)) + B z_B \theta \quad (2)$$

여기서 m , l , B , z_B , I_y , ρ 는 각각 수중운동체의 질량, 길이, 부력, 부력중심, 관성모멘트, 해수의 밀도를 가리키고, Z_q , Z_w , Z_q , Z_w , Z_{δ_b} , Z_{δ_s} , M_q , M_w , M_q , M_w , M_{δ_b} , M_{δ_s} 는 연직면 모델식에 포함되는 유체계수들이다.

연직면 선형 상태공간모델은 상태변수와 입력변수를 식 (3)으로 선정하면 식 (4)와 같이 유도된다.

$$X_d = [w, q, z, \theta]^T, U_d = [\delta_b, \delta_s]^T \quad (3)$$

$$\dot{X}_d = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & -u \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} X_d + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_d \quad (4)$$

여기서 w, q, z, θ 는 각각 히브 속도, 피치 각 속도, 심도, 피치각을 가리키며, δ_b 와 δ_s 는 선수 타와 선미타를 나타낸다. 각 행렬의 계수 a_{ij} 와 b_{ij} 는 다음과 같다.

$$a_{11} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^2 Z_w u}{m - \frac{1}{2} \rho l^3 Z_w}, \quad a_{12} = \frac{\left(\frac{1}{2} \rho l^3 Z_q + m\right) u}{m - \frac{1}{2} \rho l^3 Z_w},$$

$$a_{21} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^3 M_w u}{I_y - \frac{1}{2} \rho l^5 M_q}, \quad a_{22} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^4 M_q u}{I_y - \frac{1}{2} \rho l^5 M_q},$$

$$a_{24} = \frac{Bz_B}{I_y - \frac{1}{2} \rho l^5 M_q}, \quad b_{11} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^2 Z_{\delta s} u^2}{m - \frac{1}{2} \rho l^3 Z_w},$$

$$b_{12} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^2 Z_{\delta b} u^2}{m - \frac{1}{2} \rho l^3 Z_w}, \quad b_{21} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^3 M_{\delta s} u^2}{I_y - \frac{1}{2} \rho l^5 M_q},$$

$$b_{22} = \frac{\frac{1}{2} \rho l^3 M_{\delta b} u^2}{I_y - \frac{1}{2} \rho l^5 M_q}.$$

수평면에서의 선형 운동방정식은 식 (5)의 스웨이 방정식과 식 (6)의 요 방정식으로 주어진다.

• 스웨이 방정식

$$m\dot{w} + mur = \frac{1}{2} \rho l^4 Y_r \dot{r} + \frac{1}{2} \rho l^3 (Y_v \dot{v} + Y_r ur) + \frac{1}{2} \rho l^2 (Y_v uw + u^2 Y_{\delta r} \delta_r) \quad (5)$$

• 요 방정식

$$I_z \dot{r} = \frac{1}{2} \rho l^5 N_r \dot{r} + \frac{1}{2} \rho l^4 (N_r ur + N_v \dot{v}) + \frac{1}{2} \rho l^3 (N_v uw + u^2 N_{\delta r} \delta_r) \quad (6)$$

여기서 I_z 는 관성모멘트, $Y_r, Y_v, Y_r, Y_v, Y_{\delta r}, N_r, N_v, N_r, N_v, N_{\delta r}$ 는 각각 수평면 모델식에 포함되는 유체계수를 가리킨다.

연직면에서와 마찬가지로 수평면 선형 상태공간 모델은 식 (7)과 같이 상태변수와 입력변수를 선정함으로써 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$X_c = [v, r, \phi]^T, U_c = \delta_r \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{X}_c = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{21} & B_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} X_c + \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ 0 \end{bmatrix} U_c \quad (8)$$

여기서 v, r, ϕ 는 각각 스웨이 속도, 요 각속도, 요 각을 가리키며, δ_r 은 방향타를 의미한다. 계수 A_{ij}, B_{ij} 그리고 C_{ij} 는 각각 다음과 같다.

$$A_{11} = m - \frac{1}{2} \rho l^3 Y_v, \quad A_{12} = -\frac{1}{2} \rho l^4 Y_r,$$

$$A_{21} = -\frac{1}{2} \rho l^4 N_v, \quad A_{22} = I_z - \frac{1}{2} \rho l^5 N_r,$$

$$B_{11} = \frac{1}{2} \rho l^2 Y_v u, \quad B_{12} = \frac{1}{2} \rho l^3 Y_r u - \mu,$$

$$B_{21} = \frac{1}{2} \rho l^3 N_v u, \quad B_{22} = \frac{1}{2} \rho l^4 N_r u,$$

$$C_{11} = \frac{1}{2} \rho l^2 u^2 Y_{\delta r}, \quad C_{21} = \frac{1}{2} \rho l^3 u^2 N_{\delta r}$$

3. 무인 수중운동체의 심도제어와 방향제어를 위한 H_∞ 서보제어

일반적으로 제어시스템 설계에 있어서 페루프 시스템의 견실안정성 및 명령추종성능을 만족시키는 H_∞ 제어를 설계할 경우, 혼합감도문제⁽¹⁾로 구성하여 주어진 성능을 만족하도록 설계한다. Hozumi 등⁽⁶⁾은 LMI에 기초한 H_∞ 서보문제를 정식화하여 플랜트의 견실안정성 및 명령추종성능을 만족하는 H_∞ 제어기 설계법을 제안하였다. Hozumi 등이 제안한 제어기 설계법의 장점 중 하나는 Doyle 등⁽⁷⁾이 제안한 H_∞ 제어문제의 일부 가정들이 성립하지 않아도 된다는 점이다.

H_∞ 서보문제는 Fig. 2와 같은 2 자유도 제어시스템에서 식 (9)와 같이 주어지는 n 차 일반화 플랜트 $G(s)$ 와 기준모델에 대하여 다음 3가지 성능을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 정식화된다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \left(\begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right) \quad (9)$$

- (A1) $K(s)$ 는 내부적으로 $G(s)$ 를 안정화시킨다.
- (A2) $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$
- (A3) $K(s)$ 는 견실한 명령추종성능을 가진다.

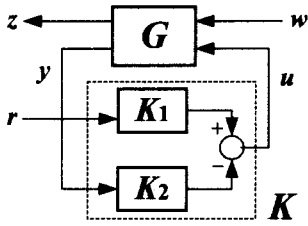


Fig. 2 H_∞ servo control

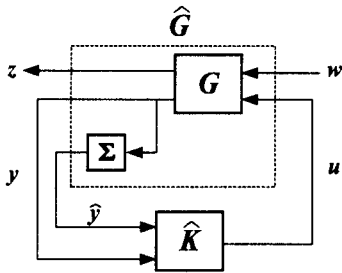


Fig. 3 H_∞ control problem equivalent to the H_∞ servo problem

여기서 w 는 외부입력(외란), u 는 제어입력, z 는 제어량, y 는 관측출력, r 은 기준입력을 각각 나타내며, $T_{zw}(s)$ 는 w 에서 z 까지의 전달함수를 의미하며, 설계해야 할 H_{∞} 서보제어기 $K(s)$ 는 식 (10)과 같이 구성된다.

$$u = K(s) \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} = [K_1(s) \quad -K_2(s)] \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

Hozumi 등은 일반화 플랜트 $G(s)$ 에 대한 H_{∞} 서보문제를 Fig. 3과 같이 기준입력 모드를 가지는 기준모델 $\Sigma(s)$ 를 포함하는 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 에 대한 H_{∞} 제어문제로 등가시켜 H_{∞} 서보제어기를 설계하는 방법을 제안하였다.

$$\Sigma(s) = \begin{bmatrix} 0 & I_k \\ I_k & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} I_k & 0 \\ 0 & I_k \\ 0 & \Sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & B_1 & B_2 \\ C_2 & 0 & D_{21} & 0 \\ \hline C_1 & 0 & D_{11} & D_{12} \\ \hline C_2 & 0 & D_{21} & 0 \\ 0 & I_k & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

기준입력을 스텝입력으로 고려할 경우, 기준입

력 수 k 와 $k \times k$ 단위행렬 I_k 에 대하여 $\Sigma(s)$ 은 식 (11)과 같이 주어진다. $\hat{G}(s)$ 은 식 (12)와 같이 주어지며, (13)의 상태공간 모델식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} \hat{G}_{11}(s) & \hat{G}_{12}(s) \\ \hat{G}_{21}(s) & \hat{G}_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B}_1 & \hat{B}_2 \\ \hline \hat{C}_1 & \hat{D}_{11} & \hat{D}_{12} \\ \hline \hat{C}_2 & \hat{D}_{21} & \hat{D}_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

변형된 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 에 대한 H_{∞} 제어 문제는 다음의 2 가지 성능을 만족하는 제어기 $\hat{K}(s)$ 을 구하는 문제로 구성된다.

(A1) $\hat{K}(s)$ 은 내부적으로 $\hat{G}(s)$ 을 안정화시킨다.

(A2) $\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma$

H_{∞} 제어문제의 해를 구하는 데 있어서 식 (13)의 $\hat{G}_{12}(s)$ 가 허축상에서 영점을 가지고, 행렬 \hat{D}_{21} 이 행 풀 랭크(full row rank)를 가지지 않으므로, Doyle 등이 제안한 해법을 적용할 수 없다. 따라서 LMI에 기초한 H_{∞} 제어해법을 적용하여 제어기를 구하게 된다. LMI에 기초한 H_{∞} 제어해법에서는 식 (13)과 같이 주어진 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 가

(a1) (\hat{A}, \hat{B}_2) 가 가안정이고, (\hat{A}, \hat{C}_2) 가 가검출이다.

(a2) $\hat{D}_{22} = 0$ 이다.

의 2 가지 가정을 만족하면 H_{∞} 제어기를 설계할 수 있다.

4. 심도 및 방향제어기 설계 및 성능분석

무인 수중운동체는 수면 근처에서 저속으로 잠항할 때 파도에 대하여 피치각 변동이 적어야 하며, 일정한 심도를 유지해야 한다. 무인 수중운동체가 수면에 근접할수록 파도의 심도유지 항해에 대한 영향이 커지며, 조류의 영향으로 인하여 정확한 방향제어가 힘들게 된다. 특히, 무인 수중운동체의 정확한 자율제어를 위해서는 모델식의 비선형성, 유체계수의 불확실한 변동으로 인한 모델링오차 등에 대하여 견실안정성이 보장되어야 한다. 따라서, 무인 수중운동체의 심도 및 방향제어기는 견실안정성, 파도와 조류 등의 외란 억제

성능 그리고 주어진 심도 및 방향에 대한 건설한 추종성능을 만족하도록 설계된다.

4.1 문제의 정식화

무인 수중운동체의 심도 및 방향제어기는 다음의 요구사항을 만족하도록 설계된다.

- (1) 유체계수 등의 불확실한 변동으로 인한 모델링오차가 존재하여도 전체 페루프 시스템은 건설안정성을 만족한다.
- (2) 외란(파도 및 조류)에 대한 억제성능을 가진다.
- (3) 모델링오차 및 외란이 존재하여도 주어진 심도 및 방향명령을 건설하게 추종한다.

무인 수중운동체의 전진방향 속도변화로 인한 유체계수의 변화, 비선형모델의 선형화에 따른 오차, 연직면과 수평면의 연성효과 그리고 무인 수중운동체의 중량 및 부력변동 등으로 인하여 발생하는 모델링오차가 존재하여도 전체 페루프 시스템의 건설안정성을 만족시키는 제어기를 설계하기 위하여 Table 1과 같이 유체계수의 변동을 고려하였다.

4.2 심도제어기 설계

수중운동체가 수면근처에서 운항할 경우, 파도는 수중운동체의 연직면 운동에 영향을 미치므로 히브방향으로 파도의 힘이 작용하고 피치방향으로 파도의 모멘트가 작용하는 외란으로 모델링된다. 파도에 대한 수중운동체의 심도제어기 설계 및 성능분석을 위하여 식 (14)와 같이 주어지는 ITTC(International towing tank conference)에서 제안한 Pierson-Moskowitz 스펙트럼⁽⁵⁾을 이용하여 불규칙한 파도를 모델링한다.

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (14)$$

여기서 $S(\omega)$ 는 파도의 에너지 밀도를 나타내며, $A = 8.1 \times 10^{-3} g^2$, $B = 3.11/h_3^2$ 로 주어지며, ω 는 파도 주파수, g 는 중력가속도, h_3 는 유의파고 (significant wave height)를 각각 가리킨다.

제어기 설계를 위한 파도의 힘과 모멘트는 식 (15)와 같이 주어지는 $S(\omega)$ 크기가 최대일 때의 주파수 ω_M 을 통과대역의 중심주파수로 가지는 4차 필터⁽⁶⁾를 이용하여 모델링된다.

Table 1 The variations of system parameters

parameters	variation	parameters	variation
$X_{\delta r \delta r}$	50 %	Y_{wp}	50 %
$X_{\delta \delta \delta \delta}$	50 %	Z_{up}	50 %
$X_{\delta \delta \delta}$	50 %	Z_{up}	50 %
$Z_{\delta \delta}$	50 %	K_{qr}	50 %
$Z_{\delta s}$	50 %	M_{vr}	50 %
Z_q	30 %	N_{pq}	50 %
M_q	30 %	W	1.0 %
X_{vr}	50 %	B	0.5 %

$$\frac{\eta}{\xi} = \frac{K(s/\omega_M)^2}{[(s/\omega_M)^2 + s/\omega_M + 1]^2} \quad (15)$$

여기서 η 는 근사화된 파도, ξ 는 백색잡음, K 는 필터계인이다.

파도의 힘과 모멘트 식 Z_w 와 M_w 는 각각 다음과 같다.

$$Z_w = a \cdot \eta(t) + b, \quad M_w = c \cdot \eta(t) + d \quad (16)$$

여기서 a, b, c, d 는 유체역학적 상수로 주어진다. 심도제어기 설계를 위한 수중운동체의 연직면 선형 상태공간모델식은 식 (17)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3391 & 0.5506 & 0 & 0 \\ 0.1580 & -0.7314 & 0 & -0.021 \\ 1 & 0 & 0 & -2.056 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1254 & -0.1016 \\ 0.0451 & -0.1090 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 수중운동체의 질량 m 은 1352kg, 길이 l 은 6m, 해수밀도 ρ 는 1025kg/m³으로 주어진다.

출력변수는 심도 z 와 피치 θ 로 선정하였다. 본 논문에서 설계된 무인 수중운동체의 H_∞ 심도 제어기의 개략도는 Fig. 4와 같다. 선수 및 선미 타의 구동기 모델식 $G_a(s)$ 는 식 (18)과 같은 1차 시스템으로 주어진다.

$$G_a(s) = \frac{s}{s+2} \quad (18)$$

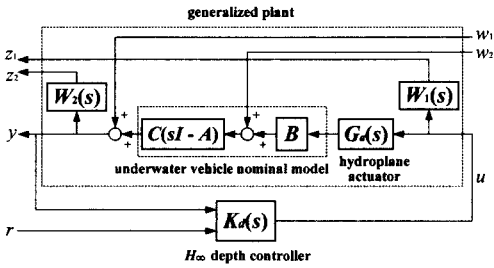


Fig. 4 The H_∞ depth controller of autonomous underwater vehicle

수중운동체의 히브와 피치 방향으로 작용하는 파도의 힘과 모멘트 성분은 Fig. 4의 외란 w_2 와 같이 플랜트의 입력항으로 나타내었고, 플랜트 출력측으로 미지의 불확실한 외란 w_1 이 존재한다고 고려하였다. 파도외란이 존재하여도 견실한 심도유지 성능을 가지도록 제어량 z_2 를 수중운동체의 심도와 피치로 선정하였고, 제어입력인 선수 및 선미타각의 제한된 범위내에서 제어성능을 가지도록 z_1 을 수중운동체의 선수 및 선미타로 선정하였다. y 는 심도 및 피치각으로 선정된 관측출력, r 은 기준입력, $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 가중함수, $K_d(s)$ 는 설계된 H_∞ 심도제어기이다.

$W_1(s)$ 은 플랜트 파라미터의 불확실한 변동, 비선형성 등으로 인한 모델링오차가 존재하여도 견실안정성을 보장하고, 선수 및 선미타각의 범위 제한을 고려하여 식 (19)와 같은 안정한 유리함수로 선정하였다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{210s+8.5}{s+5} & 0 \\ 0 & \frac{55s+10.5}{s+10} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$W_2(s)$ 는 파도의 주파수 대역을 고려하여 식 (20)과 같이 파도의 주파수 대역이상에서 상대적으로 적은 게인을 가지도록 선정하였다.

$$W_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{6.5}{s+0.958} & 0 \\ 0 & \frac{4.2}{s+1.52} \end{bmatrix} \quad (20)$$

4.3 방향제어기 설계

주어진 방향각에 대한 정확한 추종성능을 가지는 무인 수중운동체의 방향제어기 설계에 있어서

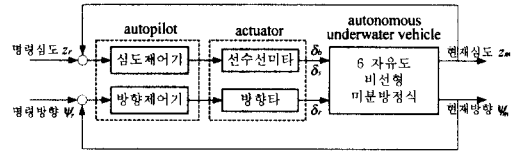


Fig. 5 System configuration for depth and course control of autonomous underwater vehicle

특히 조류의 영향으로 인한 정상상태오차를 최소화하도록 설계되어야 한다. 방향제어기 설계를 위한 무인 수중운동체의 수평면 선형 상태공간모델식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2944 & -0.5492 & 0 \\ -0.3104 & -0.7120 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1121 \\ -0.1335 \\ 0 \end{bmatrix} \delta, \quad (21)$$

여기서 출력변수는 요각 ψ 로 선정하였다.

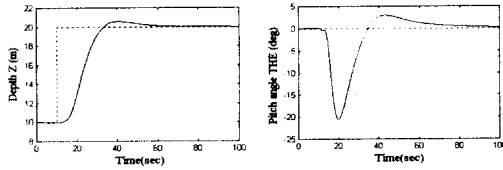
방향제어기 역시 심도제어기 설계와 마찬가지로 모델링오차에 대한 견실안정성, 외란이 존재하여도 주어진 기준입력 견실하게 추종하는 명령 추종성능을 만족하도록 H_∞ 서보제어를 적용하여 설계하였다. H_∞ 서보제어기 설계를 위한 일반화 플랜트는 Fig. 4와 동일하게 구성하였고, 가중함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 식 (22)와 같이 선정하였다.

$$W_1(s) = \frac{525s}{s+3.5}, \quad W_2(s) = \frac{7.5}{s+0.125} \quad (22)$$

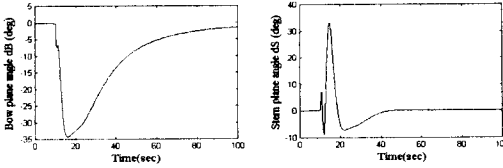
4.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 제어기의 성능평가를 위하여 무인 수중운동체의 6자유도 비선형 운동방정식에 기초한 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 무인 수중운동체의 심도제어와 방향제어를 위한 비선형 시뮬레이션 구성도는 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션시 구동장치는 작동기의 성능을 고려하여 선수타, 선미타 및 방향타를 ± 40° 로 범위를 제한하였다.

우선 모델링오차와 외란 등의 불확실성이 존재하지 않는 이상적인 경우에 대하여 설계된 심도제어기와 방향제어기의 제어성능을 평가하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 불확실성이 발생하지 않는 경우, 무인 수중운동체가 현재심도 10m에서 명령심도 20m로 하강하고, 현재요각 0° 에서 명령요각 45° 로 회전하는 경우에 대한 심도 및 요각 추종성능을 각각 나타내었다.

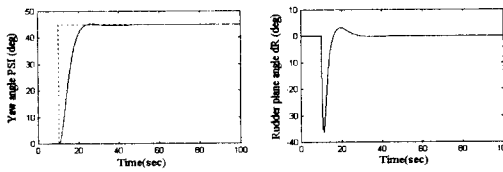


(a) Depth (b) Pitch angle



(c) Bow plane angle (d) Stern plane angle

Fig. 6 Step response of depth controller without uncertainties

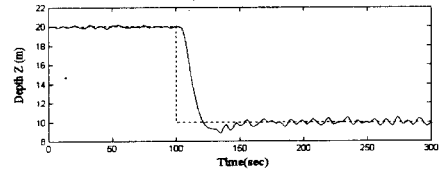


(a) Yaw angle (b) Rudder plane angle

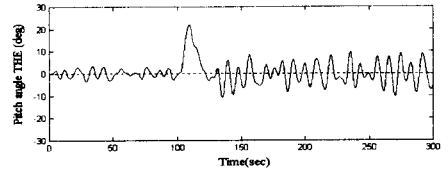
Fig. 7 Step response of course controller without uncertainties

Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에서 점선은 명령심도 및 명령요각 궤적, 실선은 무인 수중운동체의 심도 및 요각 궤적을 각각 가리킨다. 요각에 비해 심도응답에 있어서 미소한 오버슈트가 발생하였으나 무인 수중운동체는 주어진 명령심도 및 명령요각을 안정하고, 빠른 속응성으로 추종함을 알 수 있었다.

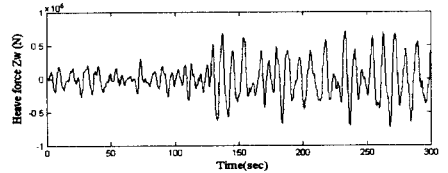
다음으로 Table 1과 같이 고려한 시스템 파라미터 변동으로 인한 모델링오차와 외란(파도 및 조류)이 발생하였을 때 무인 수중운동체의 심도 및 요각 추종성능을 나타내었다. 우선 Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)의 파도 힘과 모멘트를 야기하는 해상상태 3(파도의 유의파고 1.0m)에서 무인 수중운동체와 파도와의 교차각이 0° (following sea)인 경우, 심도제어의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. Fig. 8(a)는 무인 수중운동체가 현재심도 20m에서 명령심도 10m로 상승하였을 때의 심도 추종성능을 나타낸 그림이다. 해수면에 근접할수록 파도의 영향이 커지지만, 100초에서 10m로 상승한 후



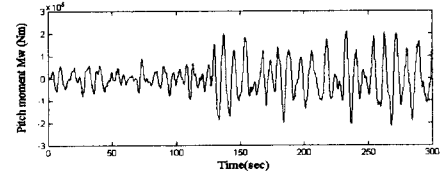
(a) Depth



(b) Pitch angle

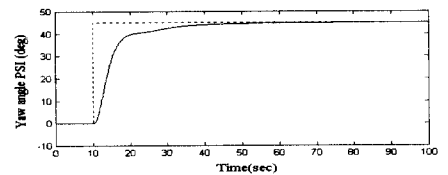


(c) Heave disturbance force

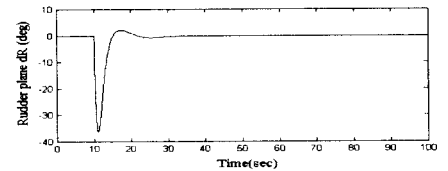


(d) Pitch disturbance moment

Fig. 8 Step response of depth controller under the modeling error and sea state 3 with encounter angle of zero degrees

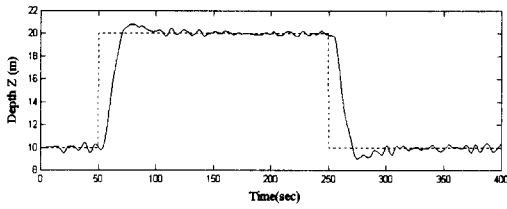


(a) Yaw angle

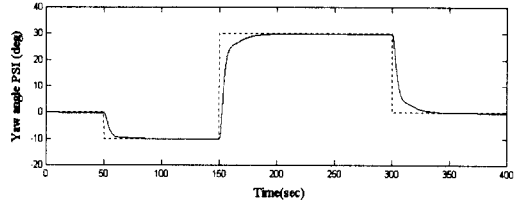


(b) Rudder plane

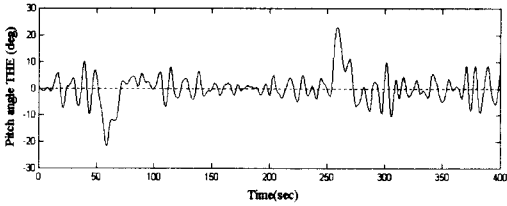
Fig. 9 Step response of course controller under the modeling error and 0.5m/s tide effect



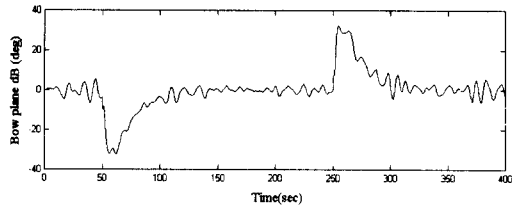
(a) Depth



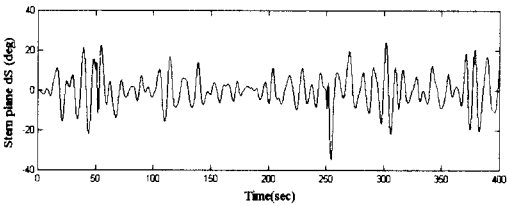
(b) Yaw angle



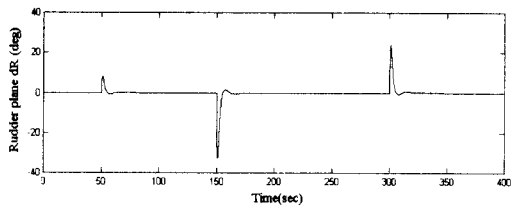
(c) Pitch angle



(d) Bow plane angle



(e) Stern plane angle



(f) Rudder plane angle

Fig. 10 Step response of autopilot(depth and course controller) under the modeling error and disturbances (wave force, wave moment and tide)

전반적으로 $\pm 0.5\text{m}$ 의 오차범위내에서 심도를 유지하였으며, 피치각은 무인 수중운동체가 10m로 상승하는 시점을 제외하고는 $\pm 10^\circ$ 이내의 변동범위를 가짐을 Fig. 8(b)에서 알 수 있었다.

방향제어기 시뮬레이션 결과로서, Fig. 9에서는 모델링오차와 0.5m/s 속도를 가지는 조류의 영향하에서의 무인 수중운동체의 요각 추종성능을 나타내었다. Fig. 7(a)에 비해 응답의 속응성이 떨어졌으며, 정상상태 오차가 발생하였으나 그 크기는 0.2% 이내로 모델링오차와 조류의 영향하에서도 방향제어기는 견실한 요각 추종성능을 나타냄을 Fig. 9(a)에서 알 수 있었다.

마지막으로, 모델링오차와 외란이 존재하는 경우 심도제어기와 방향제어기로 구성된 무인 수중운동체의 자동조종장치의 제어성능을 평가하였다. 우선, 유체계수의 변동으로 인한 모델링오차가 존재하고, 파도와 무인 수중운동체와의 교차각이 0° 인 해상상태 3에서의 파도 힘과 모멘트 그리고 0.5m/s의 조류가 발생하였다고 가정하였

다. 초기 심도 10m와 요각 0° 의 무인 수중운동체가 50초에서 동시에 심도 20m로 하강하고 요각 -10° 로 변경하도록 하였고, 일정심도 20m를 유지하는 동안 요각은 다시 150초에서 30° 로 변경하도록 하였다. 그리고 일정요각 30° 를 유지한 상태에서 250초에서 심도만 10m로 상승하도록 하였고, 마지막으로 300초에서 요각을 0° 로 유지하도록 하였다.

Fig. 10(a)에서는 무인 수중운동체의 심도 추종성능을 나타내며, 심도 20m로 하강하였을 때는 전반적으로 $\pm 0.3\text{m}$ 의 오차범위를 유지하였으나, 해수면에 근접하는 심도 10m로 상승하였을 때는 파도의 영향이 커짐으로 인하여 상승시점으로부터 30초후에 명령심도치 10m를 기준으로 최대 1.0m 변동하였으나, 전반적으로 $\pm 0.4\text{m}$ 이내의 변동범위를 유지하였다. 조류가 발생하여도 정상상태 오차는 0.2% 이내로 매우 정확한 요각의 명령 추종 응답을 가짐을 Fig. 10(b)에서 알 수 있었다. Fig. 10(c)의 피치각은 명령심도가 주어지는 시점

을 제외하고는 전반적으로 $\pm 10^\circ$ 를 유지하였다. Fig. 10(d)~Fig. 10(f)는 각각 선수타, 선미타 그리고 방향타각이 모두 설정된 제한범위인 $\pm 40^\circ$ 이 내에서 안정하게 작동하고 있음을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 수면근처에서 저속으로 운항하는 무인 수중운동체의 일정 심도유지 및 방향유지를 위하여, 유체계수의 불확실한 변동으로 인한 모델링오차에 대하여 페루프 시스템의 견실안정성을 보장하고, 파도 및 조류의 외란이 존재하여도 주어진 명령심도와 방향을 견실하게 추종하도록 하는 H_∞ 심도 및 방향제어기를 설계하였다. 제어기 설계에 있어서 무인 수중운동체가 견실한 명령추종성능을 가지도록 H_∞ 서보문제를 적용하였으며, 주어진 H_∞ 서보문제는 LMI에 기초한 H_∞ 제어해법으로부터 주어진 설계사양을 만족하는 최적해를 구하였다. 설계된 제어기는 무인 수중운동체의 6 자유도 비선형 운동방정식으로 구성된 비선형 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였으며, 결과적으로 본 논문에서 제안된 무인 수중운동체의 H_∞ 심도 및 방향제어기의 유용성과 응용가능성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 多美 勉, 1994, H_∞ 制御, 昭晃堂.
- (2) Martin, R. J., Valavani, L. and Athans, M., 1986, "Multivariable Control of a Submersible Using the LQG/LTR Design Methodology," *Proceedings of the American Control Conference*.
- (3) Williams, S. J. and Marshfield, W. B., 1990, " H_∞ Multivariable design of a Submarine Depth Control System," *Institute of Measurement and Control, Symp. Appl. Multivariable Syst. Techniques*, pp. 104~205.
- (4) Healey, A. J and Lienard, D., 1993, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327~339.
- (5) Liceaga-Castro, E. and van der Molen, G. M., 1995, "Submarine H_∞ Depth Control Under Wave Disturbances," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 338~346.
- (6) Hozumi, J., Hara, S. and Fujioka, H., 1997, "Robust Servo Problem with H_∞ Norm Constraint," *International Journal of Control*, Vol. 66, No. 6, pp. 803~823.
- (7) Doyle, J. C., Glover, K., Kargonekar, P. P. and Francis, B. A., 1988, "State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 8, pp. 831~847.
- (8) Gahinet, P., 1996, "Explicit Controller Formulas for LMI-based H_∞ Synthesis," *Automatica*, Vol. 32, No. 7, pp. 1007~1014.
- (9) 양승윤, 이만형, 1996, "수중운동체의 조종제어기 설계 연구," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제3호, pp. 850~860.