

LMI에 기초한 H_∞ 서보제어를 이용한 AUV의 강인한 자동 심도 및 방향제어

Robust Depth and Course Control of AUV Using LMI-based H_∞ Servo Control

양 승 윤* 김 인 수** 이 만 형***
Yang, Seung Yun, Kim, In Soo, Lee, Man Hyung

ABSTRACT

In this paper, robust depth and course controllers of AUV(autonomous underwater vehicles) using LMI-based H_∞ servo control are proposed. The H_∞ servo problem is modified to 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 robust depth and course controllers are designed to be satisfied the robust stability about the modeling error generated from the perturbation of the hydrodynamic coefficients and the robust tracking property under sea wave and tide disturbances. The performances of the designed controllers are evaluated by computer simulations, and these simulation results show the applicability of the proposed robust depth and course controller.

주요기술용어 : AUV(무인 수중운동체), LMI-based H_∞ Servo Control(LMI에 기초한 H_∞ 서보제어), Depth Control(심도제어), Course Control(방향제어)

1. 서 론

AUV의 가장 중요한 기능은 임무 실행동안 인간의 간섭없이 수중운동체가 임무를 자율적으로 수행할 수 있도록 하는 것이다. AUV에는 정찰, 조사, 기만 등의 주어진 임무를 자율적으로 수행하기 위하여 임무계획/실행, 경로 계획/추적, 자동조종장치(autopilot),

항법장치, 장애물 회피장치 등으로 구성되는 자율제어 시스템이 요구된다. 이 중에서도 자동 심도제어기와 자동 방향제어기로 구성되는 자동조종장치는 AUV의 자율제어에 있어서 매우 중요한 기능을 가진다.

AUV는 외부형상의 비대칭으로 인한 유체역학적인 특성 때문에 복잡한 연성효과와 강한 비선형 특성을 나타낸다. 따라서, AUV의 자동 심도 및 방향제어를 위해서는 모델링오차나 외란에 대하여 강인한 제어기 설계가 필수적으로 요구된다.

강인제어(robust control) 기법을 이용한 기존의 수

* 국방과학연구소 선임연구원

** 부산대학교 지능기계공학과 박사과정

*** 부산대학교 기계공학부 교수

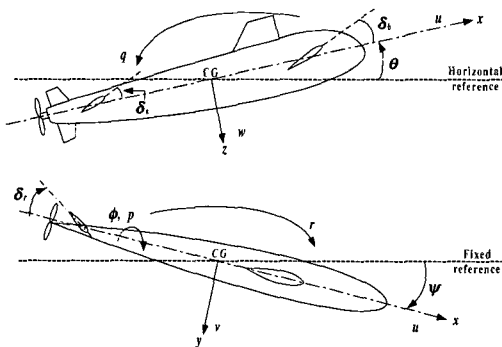
중운동체 심도 및 방향제어기 연구로서 Williams 등 [1]은 표준 H_∞ 제어기법을 이용하여 수중운동체의 모델링오차에 대한 강인한 다변수 H_∞ 심도제어기를 설계하였으며, 최근에 Liceaga-Castro 등[2]은 파도 외란을 고려한 수중운동체의 심도제어기를 μ -합성법을 적용하여 설계하였다.

본 논문에서는 LMI에 기초한 H_∞ 서보문제를 정식화하여 모델의 비선형성, 유체계수간의 연성효과 등으로 인한 모델링오차나 파도와 조류 외란의 존재 하에서도 강인한 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 수중운동체의 6 자유도 비선형식으로 구성된 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가 분석하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 AUV의 운동방정식

AUV는 운동체에 작용하는 힘과 모멘트의 관계식으로부터 유도되는 6 자유도 비선형 운동방정식으로 모델링되며, 그림 1과 같은 좌표계로 묘사된다. 제어 시스템의 설계를 위해서는 단순화된 선형모델식이



(그림 1) 수중운동체의 좌표계

필요하며, 6자유도 비선형 운동방정식으로부터 연직면과 수평면에서의 선형 운동방정식을 유도할 수 있다. AUV의 연직면과 수평면의 선형 상태공간모델식은 각각 다음과 같이 주어진다[3].

• 연직면 선형 모델

$$X_d = A_d X_d + B_d U_d \quad (1)$$

여기서 $X_d = [w \ q \ z \ \theta]^T$, $U_d = [\delta_b \ \delta_s]^T$,

$$A_d = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & \alpha_{24} \\ 1 & 0 & 0 & -u \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이다. 그리고 w, q, z, θ 는 각각 히브 속도, 피치 각속도, 심도, 피치각을 가리키며, δ_b 와 δ_s 는 선수타와 선미타를 의미한다. u 는 수중운동체의 전진속도, α_{ij} 와 β_{ij} 는 유체계수로 이루어진 상수이다.

• 수평면 선형 모델

$$C_A \dot{X}_c = C_B X_c + C_C U_c \quad (2)$$

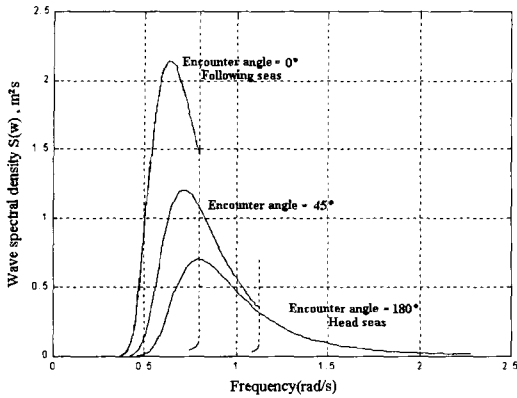
여기서 $X_c = [v \ r \ \phi]^T$, $U_c = \delta_r$,

$$C_A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_C = \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ 0 \end{bmatrix}$$

이다. 그리고 v, r, ϕ, δ_r 는 각각 스웨이 속도, 요 각속도, 요각, 방향타를 의미하며, a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 는 각각 유체계수로 이루어진 상수이다.

2.2 파도 모델링

일반적인 파도의 스펙트럼은 식 (3)과 같이 주어지는 ITTC(International towing tank conference)에서



(그림 2) 파도의 스펙트럼

제안한 스펙트럼이며, 이를 파도의 주파수에 대하여 도식화하면 그림 2와 같다[4].

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (3)$$

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.

수중운동체가 수면근처에서 운항할 경우, 파도는 수중운동체의 연직면 운동에 영향을 미치므로 히브 방향으로 파도 힘이 작용하고 피치방향으로 파도 모멘트가 작용하는 외란으로 모델링된다. 제어기 설계를 위한 파도 힘과 모멘트는 식 (4)와 같이 주어지는 $S(\omega)$ 크기가 최대일 때의 주파수 ω_M 을 통과대역의 중심주파수로 가지는 4차 필터를 이용하여 모델링된다.

$$\frac{\eta}{\xi} = \frac{K(s/\omega_M)^2}{[(s/\omega_M)^2 + s/\omega_M + 1]^2} \quad (4)$$

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

단순화된 파도 힘과 모멘트 식 Z_w 와 M_w 는 각각 다음과 같다.

$$Z_w = a \cdot \eta(t) + b, \quad M_w = c \cdot \eta(t) + d \quad (5)$$

여기서 a, b, c 그리고 d 는 유체역학적 상수로 주어진다.

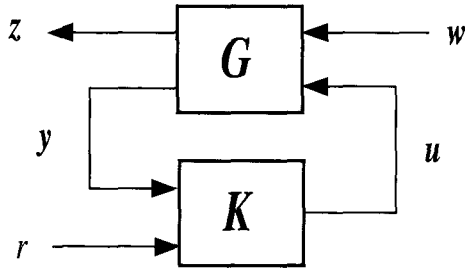
3. LMI를 이용한 H_∞ 서보제어 정식화

모델링 오차가 존재하여도 페루프 시스템의 강인 안정성을 보장하고, 기준입력에 대하여 명령추종 성능을 만족시키는 강인한 성능의 제어기를 설계하기 위하여 H_∞ 서보제어 기법을 적용하였다. H_∞ 서보문제는 그림 3과 같은 2 자유도 제어시스템에서 식 (6)과 같이 주어지는 일반화 플랜트 $G(s)$ 와 기준모델에 대하여 다음 3가지 성능을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 정식화된다[5].

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \quad (6)$$

- (i) $K(s)$ 는 $G(s)$ 를 안정화시킨다.
- (ii) $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$
- (iii) $K(s)$ 는 강인한 명령추종성능을 가진다.

여기서 w 는 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 (7)과 같이 구성된다.



(그림 3) H ∞ 서보제어

$$u = K(s) \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} = [K_1(s) \quad -K_2(s)] \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

H ∞ 서보문제가 해를 가지기 위한 필요충분 조건을 얻기 위하여 기준입력 r로부터의 피드포워드 경로를 제거한 폐루프 시스템에 대하여 고려한다. 기준입력을 스텝형으로 간주하면, $\hat{D}_r(s)$ 의 최대 불변 요소 $\phi_r(s) \in RH_\infty$ 는 식 (8)과 같이 주어지며,

$$\phi_r(s) = \frac{s}{s+1} \quad (8)$$

$K_2(s)$ 는 $\phi_r(s)$ 과 함께 식 (9)와 같이 전개된다.

$$K_2(s) = K_r(s) \phi_r^{-1}(s) I \quad (9)$$

또한 $\phi_r^{-1}(s)I$ 를 정의된 $M_1 = M_2 = I_{p_2}$ 를 이용하여, 식 (10)과 같이 전개한다.

$$\phi_r^{-1}(s)I = M_1 + M_2 \Sigma(s) \quad (10)$$

여기서 p_2 는 기준입력 수, I_{p_2} 는 $p_2 \times p_2$ 단위행렬을 의미하며, $\Sigma(s)$ 는 다음과 같이 주어지는 기준입력 모드를 포함하는 스텝형 기준모델이다.

$$\Sigma(s) = \left[\begin{array}{c|c} 0 & I_{p_2} \\ \hline I_{p_2} & 0 \end{array} \right]$$

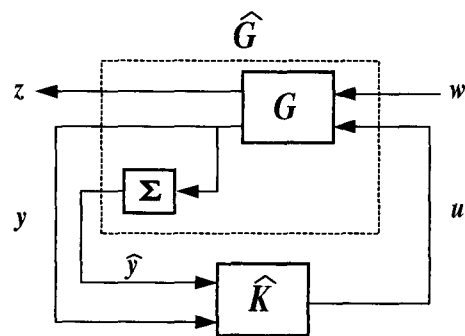
결론적으로 일반화 플랜트 $G(s)$ 에 대한 H ∞ 서보문제는 그림 4와 같이 $\Sigma(s)$ 를 포함하는 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 에 대한 H ∞ 제어 문제로 등가시킬 수 있다. $\hat{G}(s)$ 에 대한 상태공간모델식은 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\hat{G}(s) = \left[\begin{array}{cc|cc} A & 0 & B_1 & B_2 \\ C_2 & 0 & D_{21} & 0 \\ \hline C_1 & 0 & D_{11} & D_{12} \\ \hline C_2 & 0 & D_{21} & 0 \\ 0 & I_{p_2} & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (11)$$

식 (11)을 다음과 같이 간략히 표기하고,

$$\hat{G}(s) = \left[\begin{array}{c|ccc} \hat{A} & \hat{B}_1 & \hat{B}_2 \\ \hline \hat{G}_{11}(s) & \hat{D}_{11} & \hat{D}_{12} \\ \hline \hat{G}_{21}(s) & \hat{D}_{21} & 0 \\ \hline \hat{C}_1 & \hat{D}_{21} & 0 \\ \hat{C}_2 & \hat{D}_{21} & 0 \end{array} \right]$$

$\hat{G}(s)$ 의 H ∞ 제어를 $\hat{K}(s)$ 으로 두어 H ∞ 서보문제와 등가인 H ∞ 제어 문제를 정의하면 다음과 같다.



(그림 4) H ∞ 서보제어와 등가인 H ∞ 제어

H_∞ 제어 문제: 주어진 일반화 플랜트 $G(s)$ 와 기준 입력 r 에 관계된 기준모델로부터 식 (11)과 같이 구성된 수정된 일반화 플랜트에 대한 다음 두 가지 특성을 만족하는 제어기 $\hat{K}(s)$ 를 구하는 문제

- (i) $\hat{K}(s)$ 는 $\hat{G}(s)$ 를 안정화시킨다.
- (ii) $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$

수정된 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 에 대한 H_∞ 제어 문제는 $\hat{G}_{12}(s)$ 가 허축상에서 영점을 가지고, \hat{D}_{21} 이 행 풀랭크(full row rank)를 가지지 않으므로, LMI에 기초한 해법으로부터 제어 해를 구하게 된다[6]. (\hat{A}, \hat{B}_2) 이 가안정, (\hat{A}, \hat{C}_2) 이 가검출이고, $\hat{D}_{22}=0$ 인 일반화 플랜트 $\hat{G}(s)$ 에 대하여, N_R 과 N_S 를 각각 $(\hat{B}_2^T, \hat{D}_{12}^T)$ 와 $(\hat{C}_2, \hat{D}_{21})$ 의 영공간에 속하는 기저 벡터라 두면, 주어진 설계사양 γ 에 대한 준-최적 H_∞ 제어 문제는 다음 두 LMI 시스템을 만족하는 대칭 행렬 R 과 S 가 존재하기만 하면 해를 가진다.

$$\begin{pmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \hat{A}R + R\hat{A}^T & R\hat{C}_1^T & \hat{B}_1 \\ \hat{C}_1R & -\gamma I & \hat{D}_{11} \\ \hat{B}_1^T & \hat{D}_{11}^T & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \hat{A}^T S + S\hat{A} & S\hat{B}_1 & \hat{C}_1^T \\ \hat{B}_1^T S & -\gamma I & \hat{D}_{11}^T \\ \hat{C}_1 & \hat{D}_{11} & -\gamma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} R & I \\ I & S \end{pmatrix} < 0$$

4. 심도 및 방향제어기 설계

4.1 제어기 설계를 위한 문제의 공식화

AUV의 심도 및 방향제어기는 다음과 같이 설정

된 2가지 성능을 만족하도록 설계하였다.

- (i) 유체계수의 불확실한 변동, 모델의 비선형성, 연성효과 등으로 인한 모델링오차가 존재하여도 전체 페루프 시스템은 강인안정성을 만족한다.
- (ii) 모델링 오차와 파도 힘과 모멘트, 조류 등의 외란이 존재하여도 AUV는 주어진 심도와 방향명령을 강인하게 추종한다.

AUV의 전진방향 속도변화로 인한 유체계수의 변화, 연직면과 수평면의 연성효과, AUV의 중량 및 부력변동 등으로 인하여 발생하는 모델링오차가 존재하여도 전체 페루프 시스템의 강인안정성을 만족시키는 제어기를 설계하기 위하여 표 1과 같이 유체계수의 변동을 고려하였다.

4.2 심도제어기 설계

H_∞ 서보제어를 이용한 심도제어기 설계를 위한 AUV의 연직면 선형 상태공간모델식은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3391 & 0.5506 & 0 & 0 \\ 0.1580 & -0.7314 & 0 & -0.021 \\ 1 & 0 & 0 & -2.056 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

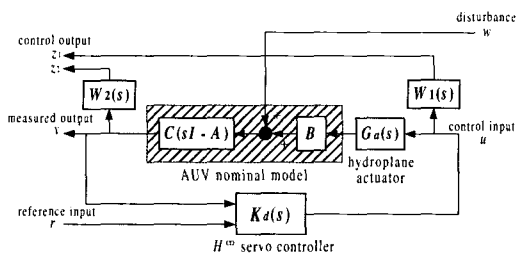
$$+ \begin{bmatrix} -0.1254 & -0.1016 \\ 0.0451 & -0.1090 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix}$$

여기서 출력변수는 심도 z 와 피치 θ 로 선정하였다.

설계된 AUV의 심도제어를 위한 H_∞ 서보제어기의 개략도는 그림 5와 같다. 수중운동체의 히브와 피치 방향으로 작용하는 파도 힘과 모멘트는 w 로, 파도 외란이 존재하여도 강인한 심도유지 성능을 가지도

(표 1) 유체계수 변동

유체계수	변동량	유체계수	변동량
$X_{\delta r \delta r}$	30 %	Y_{up}	30 %
$X_{\delta b \delta b}$	30 %	Z_{vp}	30 %
$X_{\delta \delta \delta}$	30 %	Z_{vp}	30 %
$Z_{\delta b}$	30 %	K_{qr}	30 %
$Z_{\delta s}$	30 %	M_{vr}	30 %
Z_q	30 %	N_{pq}	30 %
M_q	30 %	W	1.0 %
X_{vr}	30 %	B	0.5 %

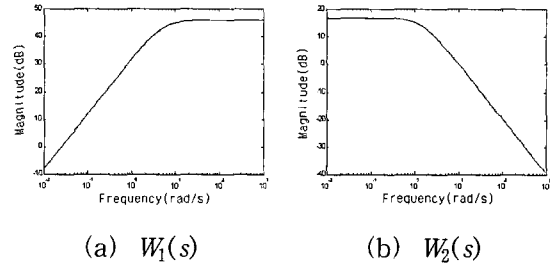


[그림 5] AUV의 H_∞ 서보제어

록 z_2 를 심도와 피치로, 제어입력의 제한을 위하여 z_1 을 선수 및 선미타로 각각 선정하였다. y 는 심도 및 피치가, $K_d(s)$ 는 설계된 H_∞ 심도제어기이다. 가중함수 $W_1(s)$ 은 모델링오차에 대한 강인안정성, 선수 및 선미타각의 범위 제한을 고려하여 선정하였고, $W_2(s)$ 는 파도의 주파수 대역이상에서 상대적으로 적은 크기를 가지도록 선정하였다. 선정된 $W_1(s)$ 과 $W_2(s)$ 는 식 (13)과 같은 안정한 유리함수로 주어지며, 주파수역에 대한 크기 선도를 그림 6에서 나타내었다.

$$W_1(s) = \frac{200s}{s+5}, \quad W_2(s) = \frac{6}{s+1.5} \quad (13)$$

선정된 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 와 연직면 선형모델식 (12)로부터 식 (6)과 같이 일반화 플랜트를 구성하여 H_∞



(그림 6) H_∞ 서보제어기 설계를 위한 가중함수

서보문제를 정식화하였고, 이로부터 식 (7)과 같이 주어지는 심도제어를 위한 H_∞ 서보제어기 $K(s)$ 를 설계하였다.

4.3 방향제어기 설계

주어진 방향각에 대한 정확한 추종성을 가지는 AUV의 방향제어기 설계에 있어서 특히 조류의 영향으로 인한 정상상태오차를 최소화하도록 설계되어야 한다. 방향제어기 설계를 위한 AUV의 수평면 선형 상태공간모델식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2944 & -0.5492 & 0 \\ -0.3104 & -0.7120 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1121 \\ -0.1335 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (14)$$

여기서 출력변수는 요각 ϕ 로 선정하였다.

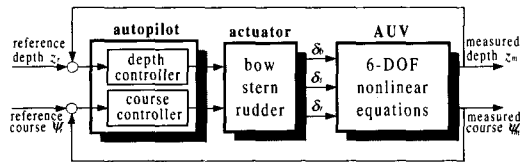
방향제어기 역시 심도제어기 설계와 마찬가지로 모델링오차에 대한 강인안정성, 외란이 존재하여도 주어진 기준입력 강인하게 추종하는 명령추종 성능을 만족하도록 H_∞ 서보제어를 적용하여 설계하였다. H_∞ 서보제어기 설계를 위한 일반화 플랜트는 그림 5와 동일하게 구성하였고, 가중함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 식 (15)와 같이 선정하였다.

$$W_1(s) = \frac{525s}{s+3.5}, \quad W_2(s) = \frac{7.5}{s+0.125} \quad (15)$$

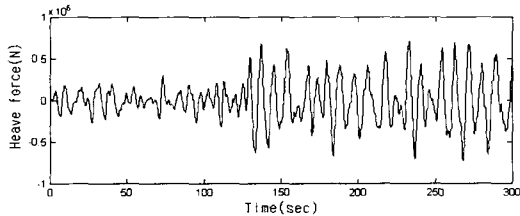
5. 시뮬레이션 및 성능평가

5.1 시뮬레이션 조건

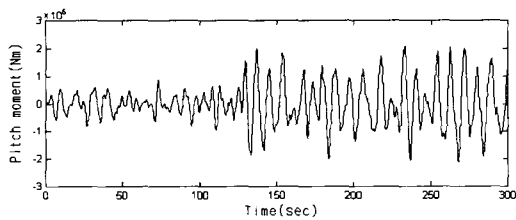
설계된 제어기의 성능평가를 위하여 AUV의 6자유도 비선형 운동방정식에 기초한 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. AUV의 심도제어와 방향제어를 위한 비선형 시뮬레이션 구성도는 그림 7과 같다. 이때, 시뮬레이션에서 고려한 외란은 파도와 AUV와의



(그림 7) AUV의 심도제어와 방향제어를 위한 비선형 시뮬레이션의 개략도



(a) 파도 힘(히브방향)



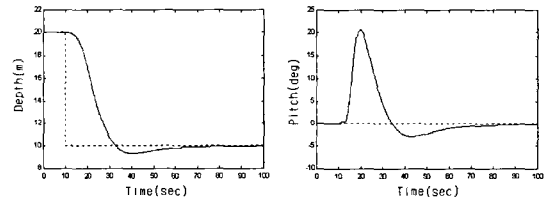
(b) 파도 모멘트(피치방향)

(그림 8) 해상상태 3에서의 파도 힘과 모멘트

교차각이 0° 인 해상상태 3에서의 파도 힘과 모멘트 그리고 0.5m/s의 조류로 고려하였다. 그림 8(a)와 그림 8(b)에서는 AUV의 히브방향으로 발생하는 파도 힘과 피치 방향으로 발생하는 파도 모멘트를 각각 나타내었다. 시뮬레이션시 구동장치는 시스템의 안정성을 고려하여 선수타, 선미타 및 방향타를 ±4° 로 제한하였다.

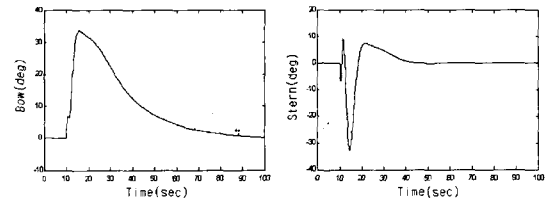
5.2 시뮬레이션 결과 및 분석

우선 모델링오차와 외란 등의 불확실성이 존재하지 않는 이상적인 경우에 대하여 AUV가 현재심도 20m에서 명령심도 10m로 상승하고, 현재요각 0° 에서 명령요각 40° 로 회전하도록 하는 심도 및 요각 추종성능을 그림 9에서 나타내었다. 그림 10에서는



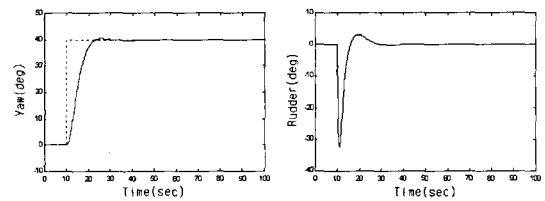
(a) 심도

(b) 피치각



(c) 선수타각

(d) 선미타각



(e) 요각

(f) 방향타각

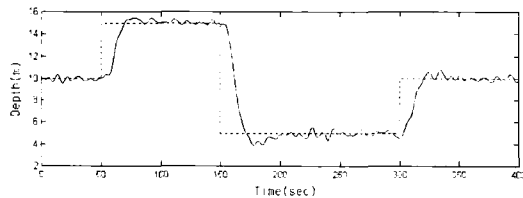
(그림 9) 불확실성이 존재하지 않을 때 AUV의 스텝응답

표 1과 같은 유체계수의 변동이 발생하고, 그림 8과 같은 파도 힘과 모멘트 그리고 0.5m/s의 조류가 발생하였을 때의 AUV의 심도 및 요각 추종성능을 나타내었다. 초기 심도 10m와 요각 0°의 AUV가 50초에서 심도 15m로 하강하고 요각 -10°로 회전하도록 하였고, 심도 15m를 유지하는 동안 요각은 다시 100초에서 30°로 회전하도록 하였다. 그리고 요각 30°를 유지한 상태에서 150초에서 심도만 5m로 상승하도록 하였고, 마지막으로 300초에서 요각을 0°로 유지하도록 하였다. 그림 10(a)의 심도궤적에서 심도 15m로 하강하였을 때는 전반적으로 ±0.3m의 오차범위를 유지하였으나, 해수면에 매우 근접하는

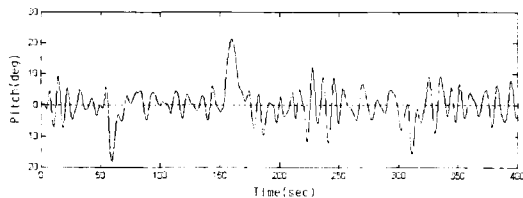
심도 5m로 상승하였을 때는 파도의 영향이 매우 커져 상승시점으로부터 35초후에 명령심도치 5m를 기준으로 최대 1.0m 이상 변동하였으나, 전반적으로 ±0.4m이내의 변동범위를 유지하였다. 조류가 발생하여도 정상상태 오차는 0.2% 이내로 매우 정확한 요각의 명령추종 응답을 가짐을 그림 10(c)에서 알 수 있었다.

6. 결 론

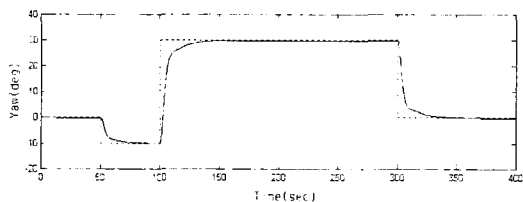
본 논문에서는 AUV의 자동심도 및 방향유지 성능을 가지는 제어기 설계를 위하여, 유체계수의 불확실한 변동으로 인한 모델링오차에 대하여 페루프 시스템의 강인안정성을 보장하고, 파도 및 조류의 외란이 존재하여도 주어진 명령심도와 방향을 강인하게 추종하도록 H_∞ 서보제어 기법을 이용하였다. 주어진 H_∞ 서보문제는 LMI에 기초한 H_∞ 제어해법으로 정식화되었으며, 이로부터 주어진 설계사양을 만족하는 최적해를 구하였다. 설계된 심도 및 방향 제어기는 AUV의 6 자유도 비선형 운동방정식으로 구성된 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 평가하였으며, 결과적으로 본 논문에서 제안된 강인한 심도 및 방향제어기의 응용가능성을 확인하였다.



(a) 심도



(b) 피치각



(c) 요각

그림 10. 모델링 오차와 외란(파도 힘, 모멘트 조류)이 존재할 때 AUV의 스텝응답

참 고 문 헌

1. Williams, S. J. and Marshfield, W. B., " H_∞ Multivariable design of a Submarine Depth Control System", Inst. of Meas. and Contr., Symp. Appl. Multivariable Syst. Techniques, pp 104~205, 1990.
2. Liceaga-Castro, E. and van der Molen, G. M., "Submarine H_∞ Depth Control Under Wave Disturbances", IEEE Transactions on Control Systems Technology,

- Vol. 3, No. 3, pp. 338~346, 1995.
3. 양승윤, 이만형, “수중운동체의 조종제어기 설계 연구”, 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제3호, pp. 850~860, 1996.
 4. 기본 조선학, 미국조선학회, 1966.
 5. Hozumi, J., Hara, S. and Fujioka, H., “Robust Servo Problem with H_∞ Norm Constraint”, International Journal of Control, Vol. 66, No. 6, pp. 803~823, 1997.
 6. Gahinet, P., “Explicit Controller Formulas for LMI-based H_∞ Synthesis”, Automatica, Vol. 32, No. 7, pp. 1007~1014, 1996.