

수중 운동체의 운동 특성을 고려한 입/출력 제어기 구성에 관한 고찰

조경남*, 서동철**, 최항순†***

서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단*
서울대학교 조선해양공학과**
서울대학교 해양시스템 공학연구소***

A Study on an Input–Output Controller Based on the Time–Scale Properties of an Underwater Vehicle Dynamics

Gyungnam Jo*, Dong C. Seo** and Hang S. Choi†***

Marine Technology Education and Research Center, Seoul National University*
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University**
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University***

Abstract

In this paper, it is shown that an input–output (I/O) feedback linearized controller can be designed rationally by utilizing the time–scale properties of heave and pitch for an underwater vehicle. It is assumed that the dynamics of the vehicle is restricted to the vertical plane. An output–feedback control is designed, which stabilizes steady cruising paths. It is shown that the vehicle dynamics with acceleration as output becomes minimum phase. The dynamics can be transformed into a reduced system through a kind of partial linearization and singular perturbation technique. The reduced system is not only minimum phase but also exactly I/O linearizable via feedback. The I/O dynamic characteristics of the heave and pitch modes can be made linear and decoupled. Furthermore it becomes independent of cruising condition such as vehicle velocity. This study may help for designing autopilot systems for underwater vehicles.

※Keywords: Hydrodynamics of underwater vehicles(수중운동체 동역학), Underwater control system(수중 제어 시스템), Input–Output feedback linearization(입/출력 되먹임 선형화), Singular perturbation(특이 섭동법), Actuator dynamics(구동기 동역학)

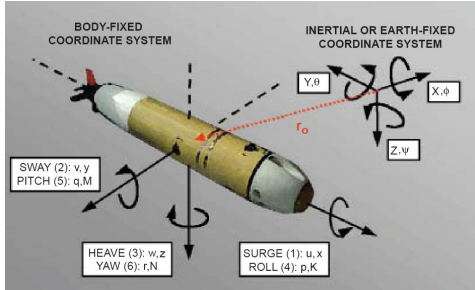


Fig. 1 Coordinate systems

(x, y, z)	동체 좌표계 (Fig. 1)
i, j, k	x, y, z 축에 대한 단위 벡터
u, v, w	동체의 x, y, z 방향 선속도
p, q, r	동체의 x, y, z 방향 각속도
I_x, I_y, I_z	x, y, z 축 2 차 모멘트
X_c, Y_c, Z_c	c 방향 운동 성분에 기인한 x, y, z 축방향 동유체력 미계수
M_c	c 방향 운동 성분에 기인한 종동요 동유체력 모멘트 미계수
x_G, y_G, z_G	무게중심의 x, y, z 좌표
α, δ_a	받음각(angle of attack)과 방향타 각도
g, W, B, z_B	중력 가속도, 중량, 부력 및 z -방향 부심
$\bar{C}_c(\alpha, V, \delta_a)$	동체의 c 방향 운동 시 수중운동체가 받는 동유체력 중 주요 성분을 제외한 성분

1. 도입

이 논문에서는 방향타를 이용하는 수중운동체의 동역학에 나타나는 시간적 특성을 고려하여 입/출력 되먹임 선형화 제어기를 다룬다. Jang and Park(2006)은 잠수함에 작용하는 힘을 받음각과 전진 속력으로 표현하는 것이 유효하다는 것을 보였다. Son et al.(2006)과 Bae et al.(2007)은 전진 속력이 느린 만타형 무인 잠수정의 운동 모델 및 동적 안정성에 관한 연구를 수행한 바 있다.

일반적으로 수중운동체의 동역학은 비선형이며, 운동 모드간 연성 효과 때문에 수중 운동체에 대한 자동 제어 시스템의 설계가 쉽지 않다 (Abkowitz 1969, Choi et al. 2006, Seol et al. 2005, Yeo et al. 2006). 더욱이 방향타를 이용하

여 수중운동체를 제어할 경우 일반적으로 시스템 응답은 최소 위상 시스템(minimum-phase system)이 되지 않는다(Fossen 2002).

이와 같은 어려움을 극복하기 위하여 수중 운동체의 운동 모드 간 시간적 특성을 특이 섭동법으로 분리하는 방법이 제안되었다. Oh and Ha(1997)와 Lee and Ha(1999)는 특이 섭동법을 이용하여 고속으로 운동하는 미사일의 유도 제어기 동역학 중 저주기 운동을 분리하는 방법을 제안하였다. 수중 운동체 분야에서는 Bhatta and Leonard(2004)가 특이 섭동법을 이용하여 운동 모드를 분리하여 수중 글라이더의 저주기 종동요 안정성을 해석하였다.

입/출력 되먹임 선형화 기법은 되먹임을 통해 시스템의 비선형성을 제거함으로써 시스템의 입력과 출력 사이의 관계를 선형화하는 방법으로 비행기(Romano and Singh 1990)와 전술 미사일(Huang et al. 1992), 수상선(McGooking et al. 2000) 및 수중 운동체(Healey and Lienard 1993)의 유도 제어기에 사용된 바 있다. 하지만 입/출력 선형화 기법을 수중 운동체에 바로 적용하면 복잡한 유체 동역학적 특성 때문에 제어기의 구성이 쉽지 않다. 특히 시스템에서 입력의 영향을 받지 않는 영 동역학(zero dynamics)의 불안정성으로 인하여 내부 안정성(internal stability)이 깨질 가능성도 있다(Lin 1994).

한편 구동기의 동역학은 특이 섭동법을 이용하여 운동 모드를 분리하여 시스템의 제어기를 구성하는 경우 안정성에 영향을 줄 수 있다.

Fig. 2는 일반적인 제어기 구성에 관한 블록 선도를 보여준다. 수중 운동체의 제어기 설계에 관한 연구에서 대부분 시스템의 제어 입력인 r_c 에서 동체 동역학의 입력인 r_a 로 연결되는 구동기의 반응 속도는 충분히 빠르다고 가정하는 정적 되먹임

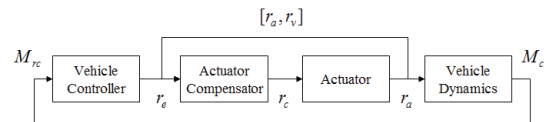


Fig. 2 A control system including actuator dynamics

(static feedback) 제어를 설계한다. 하지만 구동기 드라이버의 출력인 r_a 는 유한한 반응 속도를 갖는다. 제어 입력이 구동기의 반응 속도보다 빠르게 변한다면 구동기의 동역학에 따라 제어기의 성패가 좌우될 수도 있다.

이 연구에서는 부분 선형화 방법과 특이 섭동법을 이용하여 수중 운동체의 입/출력 제어를 구성한 다음 운동 모드 간의 시간적 특성을 분리하는 제어 기법을 제안한다. 이를 이용하여 특이 섭동법과 역함수 기법을 이용하여 수중 운동체의 동역학을 차수 감소 시스템(reduced system)으로 단순화하여 입/출력 제어를 구성한다. 그리고 구동기 동역학이 1 차 저역 통과 필터(1st order Low-pass filter)의 형태를 갖을 때 구동기 동역학이 빠르면 제안한 제어 방식이 유효함을 보인다.

2. 운동 모드 간 시간적 특성

일반적으로 방향타를 갖는 수중 운동체에 작용하는 힘은 동체 좌표계에서 받음각과 전진 속도 그리고 방향타 각도의 함수로 표현할 수 있다 (Fossen 2002, Jang and Park 2006).

Fossen(2002)에 따르면 X-Z 평면에서 중성 부력인 수중 운동체의 동역학은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & mz_G - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -mx_G - Z_{\dot{q}} \\ mz_G - X_{\dot{q}} & -mx_G - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & X_w & X_q \\ Z_u & Z_w & Z_q + (m - X_{\dot{u}})u \\ M_u & M_w - (Z_w - X_{\dot{u}})u & M_q - mx_G u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W(z_G - z_B)\sin\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_u(\alpha, V, \delta_a) \\ C_w(\alpha, V, \delta_a) \\ C_q(\alpha, V, \delta_a) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $V = \sqrt{u^2 + w^2}$ 는 전진 속력을 의미한다. 문제를 단순화하기 위하여 다음과 같이 가정한다. (A1) x 방향으로 속도는 일정하며 ($u = u_0 = const.$), z 방향 운동에 비하여 매우 크다

($u \gg w$). 이 가정은 $V \approx u_0$ 을 보장한다.

(A2) 질점과 부심은 좌표계의 중심에 있다. 따라서 $(x_G, y_G, z_G) = (x_B, y_B, z_B) = (0, 0, 0)$ 이다.

(A3) $(m - Z_{\dot{w}})(I_y - M_{\dot{q}}) \gg Z_{\dot{q}}^2$ 이다. 따라서 $Z_{\dot{q}} \approx 0$ 이라 가정한다.

(A4) $C_w(0, 0, 0) = 0$ 그리고 $C_q(0, 0, 0) = 0$ 이다. 위 가정을 (1)에 적용하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} &= Z_w w + (m - X_{\dot{u}})u_0 q + C_w(\alpha, \delta_a) \\ \dot{w} &= \frac{Z_w}{m - Z_{\dot{w}}} w + \frac{Z_q + (m - X_{\dot{u}})u_0}{m - Z_{\dot{w}}} q + \frac{C_w(\alpha, \delta_a)}{m - Z_{\dot{w}}} \\ &= \bar{Z}_w w + \bar{m} u_0 q + \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) \\ (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} &= M_q q + \{M_w - (Z_w - X_{\dot{u}})u_0\} w + C_q(\alpha, \delta_a) \\ \dot{q} &= \frac{M_q}{I_y - M_{\dot{q}}} q + \frac{M_w - (Z_w - X_{\dot{u}})u_0}{I_y - M_{\dot{q}}} w + \frac{C_q(\alpha, \delta_a)}{I_y - M_{\dot{q}}} \\ &= \bar{M}_q q - \bar{I}_q u_0^{-1} w + \bar{C}_q(\alpha, \delta_a) \end{aligned} \quad (2)$$

이때, 동유체력 미계수 $\bar{C}_w(\alpha, \delta_a)$ 와 $\bar{C}_q(\alpha, \delta_a)$ 는 $\bar{C}_w(\alpha, \delta_a) = \bar{C}_{wb}(\alpha) + \bar{C}_{wd}\delta_a$ 와 $\bar{C}_q(\alpha, \delta_a) = \bar{C}_{qb}(\alpha) + \bar{C}_{qd}\delta_a$ 으로 놓을 수 있다고 가정한다. 위 식에서 \bar{C}_{wd} 와 \bar{C}_{qd} 는 상수이다. 그리고 새로운 동유체력 미계수 $\bar{C}_b(\alpha)$ 를 도입한다.

$$\begin{aligned} \bar{C}_b(\alpha) &\equiv \bar{C}_q(\alpha, \delta_a) - \frac{\bar{C}_{qd}}{\bar{C}_{wd}} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) \\ &= \bar{C}_{qb}(\alpha) - \frac{\bar{C}_{qd}}{\bar{C}_{wd}} \bar{C}_{wb}(\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

받음각은 $\alpha = \tan(w/u)$ 이므로 (A1)에 의하여 $w \approx \alpha u$ 라 할 수 있다. 따라서 (2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \bar{Z}_w \alpha + \bar{m} q + \frac{1}{u_0} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) \\ \dot{q} &= \bar{M}_q q - \bar{I}_q \alpha + \bar{C}_q(\alpha, \delta_a) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)를 근선형 시스템(almost linear system)으로 변형하기 위하여 방향타의 변위를 포함하는 제어입력을 다음과 같이 상정한다.

$$u_w = \bar{Z}_w \alpha + \bar{m}q + \frac{1}{u_0} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) \quad (5)$$

이때 방향타의 제어 입력과 시스템의 제어 입력의 관계는 다음과 같다.

$$\delta_a = \frac{1}{\bar{C}_{wd}} \{u_0(u_w - \bar{Z}_w \alpha - \bar{m}q) - \bar{C}_{wb}(\alpha)\} \quad (6)$$

(5)에 의하여 (4)를 다음과 같이 정리한다.

$$\dot{\alpha} = \bar{Z}_w \alpha + \bar{m}q + \frac{1}{u_0} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) \quad (7a)$$

$$\dot{q} = \bar{M}_q q - \bar{I}_q \alpha + \bar{C}_b(\alpha) + \frac{\bar{C}_{qd}}{\bar{C}_{wd}} u_0 (u_w - \bar{Z}_w \alpha - \bar{m}q) \quad (7b)$$

(7)에 특이 섭동법을 적용하기 위하여 이 식을 표준형으로 변형한다. 이를 위하여 새로운 매개변수 $\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\bar{C}_{qd}}{\bar{C}_{wd}} u_0$ 를 도입한다. ε 은 시스템의 다른 변수들에 비해 상대적으로 작은 물리량이므로 (7)에 특이 섭동법을 적용할 수 있다 (Kokotovic et al. 1999, Khalil 2002, Cha et al. 2004).

(7)의 경계층 시스템 (boundary-layer system)이 안정하면 (7b)의 해가 존재하는 다양체(manifold)는 (7a)의 해가 존재하는 다양체로 수렴한다. 다중 시간 전개법(multi-timescale expansion)을 적용하기 위하여 (7)을 다음과 같이 표준 특이 섭동형으로 변형한다.

$$\dot{\alpha} = \bar{Z}_w \alpha + \bar{m}q + \frac{1}{u_0} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) = f(\alpha, q, \varepsilon) \quad (8a)$$

$$\varepsilon \dot{q} = \varepsilon \{ \bar{M}_q q - \bar{I}_q \alpha + \bar{C}_b(\alpha) \} + (u_w - \bar{Z}_w \alpha - \bar{m}q) = g(\alpha, q, \varepsilon) \quad (8b)$$

(8b)에서 $\varepsilon = 0$ 이 되는 특이점에서의 해를 구한다.

$$\begin{aligned} 0 &= u_w - \bar{Z}_w \alpha - \bar{m}q \\ \Rightarrow q &= \frac{1}{\bar{m}} (u_w - \bar{Z}_w \alpha) = h(\alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

(8)을 특이점을 따라 해석하기 위하여 (9)의 결과를 이용하여 좌표변환한다.

$$\eta = q - \frac{1}{\bar{m}} (u_w - \bar{Z}_w \alpha)$$

새로운 좌표계에서 (8)을 정리한다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= f(\alpha, \eta + h(\alpha), \varepsilon) \\ \varepsilon \dot{\eta} &= g(\alpha, \eta + h(\alpha), \varepsilon) - \varepsilon \frac{\partial h}{\partial \alpha} f(\alpha, \eta + h(\alpha), \varepsilon) \end{aligned} \quad (10)$$

(10)에서 $\varepsilon \tau = t$ 와 α 는 τ 시간 공간에서 고정된 값처럼 다루며, $\eta = 0$ 에서 평형점을 갖는다. (8)에서 (10)으로의 좌표변환 $\eta = q - h(\alpha)$ 은 안정성 조건을 보존한다 (Kokotovic et al. 1999, Khalil 2002).

Khalil(2002)은 역 리아푸노프 정리를 이용하여 (10)의 형태로 정리되는 표준 특이 섭동형을 갖는 시스템에 대하여 평형점을 지수적으로 안정하게 만드는 ε 이 존재함을 보였다.

이제 새로운 좌표계에서 차수 감소 시스템(reduced system)과 경계층 시스템은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{\alpha} = u_w + \frac{1}{u_0} \bar{C}_w(\alpha, \delta_a) = u_w \quad (11a)$$

$$\frac{d\eta}{d\tau} = g(\alpha, \eta + h(\alpha), 0) = -\bar{m}\eta \quad (11b)$$

따라서 (2)로 주어지는 수중운동체의 경우, 충분히 작은 ε 에 대하여 종동요 운동이 안정하면 이 응답은 상하동요의 안정성에 영향을 주지

않는다. 이를 이용하여 (2)로 주어지는 수중운동체의 상하동요 입/출력 제어기를 (9)와 같이 주어지는 종동요 모드의 준정적 해와 (11a)로 주어지는 차수 감소 모델을 이용하여 설계할 수 있다.

3. 입/출력 선형화 제어기 설계

(4)에서 입/출력 되먹임 제어기를 구성하기 위하여 방향타의 출력을 시스템의 출력으로 상정한다.

$$A_\alpha = \bar{C}_{wd} \delta_a \tag{12}$$

Lyapunov-like 방법에 의하여 (11)은 (4)와 (12)를 다음과 같은 입/출력 시스템으로 변환할 수 있다 (Lee and Ha 1999, Cha et al. 2004).

$$\dot{\alpha} = u_w \tag{13a}$$

$$A_\alpha = -\bar{C}_{wb}(\alpha) \tag{13b}$$

(13)에서 입력 u_w 과 출력 A_α 의 관계는 최소 위상 시스템이 되며, 이를 이용하여 입/출력 되먹임 선형제어기를 설계할 수 있다.

(13b)의 양변을 시간에 대하여 미분한다.

$$\dot{A}_\alpha = -\frac{\partial \bar{C}_{wb}(\alpha)}{\partial \alpha} \dot{\alpha} = -\frac{\partial \bar{C}_{wb}(\alpha)}{\partial \alpha} u_w \tag{14}$$

시스템의 제어 입력을 다음과 같이 정리한다.

$$u_w = -\left\{ \frac{\partial \bar{C}_{wb}(\alpha)}{\partial \alpha} \right\}^{-1} v_w \tag{15}$$

(15)에 의하여 $\dot{A}_\alpha = v_w$ 가 된다. 그리고 v_w 의 동역학을 다음과 같이 정리한다.

$$\dot{v}_w = -a_c v_w + b_c (A_{ac} - A_\alpha) \tag{16}$$

따라서 제어명령 A_{ac} 에서 출력 A_α 까지의 전달 함수를 아래와 같은 2 차 선형 시스템의 형태로

정리할 수 있다.

$$\frac{A_\alpha}{A_{ac}} = \frac{b_c}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{17}$$

(17)에서 ζ 와 ω_n 은 시스템의 응답속도를 결정하기 위한 설계 변수가 된다.

4. 구동기 동역학

Fig. 2 에서 r_e 이 r_a 로 이어지는 형태를 갖는 블록선도로 구성된 구동기의 동역학이 1 차 저역 통과 필터의 형태를 갖는다고 가정하자. 그러면 구동기의 동역학은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\dot{\delta}_a = -\tau_c \delta_a + \tau_c \delta_e \tag{18}$$

(18)에 의하여 (6)을 다음과 같이 치환한다.

$$\dot{\delta}_a = -\tau_c \delta_a + \tau_c \frac{1}{\bar{C}_{wd}} \{ u_0 (u_w - \bar{Z}_w \alpha - \bar{m}q) - \bar{C}_{wb}(\alpha) \} \tag{19}$$

앞 장에서 제안한 유도한 입/출력 선형화 제어기의 제어 입력은 (19)로 치환할 수 있다. 제안한 제어 방식이 성립하기 위하여 구동기의 동역학은 pitch 동역학의 반응 속도를 충분히 따를 수 있어야 한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\delta}_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \bar{M}_q & \bar{C}_{qd} \\ -\tau_c & -\tau_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \delta_a \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\bar{I}_q \alpha + C_{qd}(\alpha) \\ \tau_c \{ u_0 (u_w - \bar{Z}_w \alpha) - \bar{C}_{wd}(\alpha) \} \end{bmatrix} \tag{20} \\ &= A \begin{bmatrix} q \\ \delta_a \end{bmatrix} + B \end{aligned}$$

(4)와 (19)에 의하여 pitch 동역학과 구동기 동역학 사이의 동역학을 (20)과 같이 정리한다.

구동기의 동역학이 (19)로 주어지는 제어 입력의 불안정성을 초래하지 않도록 (20)에서 행렬 A 의 특성 방정식을 살펴본다.

$$\det \begin{bmatrix} \lambda - \bar{M}_q & -\bar{C}_{qd} \\ \frac{\tau_c}{\bar{C}_{wd}} u_0 \bar{m} & \lambda + \tau_c \end{bmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow \lambda^2 + (\tau_c - \bar{M}_q) \lambda - \tau_c \bar{M}_q + \tau_c \frac{\bar{C}_{qd}}{\bar{C}_{wd}} u_0 \bar{m} = 0 \quad (21)$$

(21)에서 \bar{M}_q 는 음수이고 나머지 변수들은 모두 양수이므로 근과 계수와의 관계에서 A 는 Hurwitz 행렬이 된다. 1 차 저역 통과 필터 형태의 동역학을 지니는 구동기의 빠른 응답은 pitch 동역학을 빠르게 안정화시킨다. 또한 제안한 제어기법을 구동기 동역학을 고려한 동적 되먹임으로 구성하더라도 성립한다는 사실을 보여준다. 따라서 1 차 저역 통과 필터의 형태를 지니는 빠른 응답을 갖는 구동기를 사용하면 제안한 입/출력 선형화 제어기법에서 제어 입력을 Fig. 2 에서 $\delta_a = \delta_e$ 와 같이 정적 되먹임 방식으로 구성하여도 제안한 제어 기법의 안정성은 영향을 받지 않는다.

5. 시뮬레이션

미해군의 심해 구조용 잠수정인 DSRV(Healey 1992)를 이용하여 이 연구에서 제안한 입출력 선형화 제어기의 성능을 살펴본다.

(17)에서 입/출력 선형화 제어기는 ζ 와 ω_n 을 각각 0.7071 과 2 rad/s 로 놓는다. 그리고 1 차 저역 통과 필터의 형태를 갖는 구동기 동역학을 포함하여 입/출력 제어기의 유효성을 확인한다.

먼저 구동기 동역학을 고려하지 않은 경우의 응답은 Fig. 3 에서 볼 수 있다. 제안한 입/출력 선형화 제어기에 의하여 시스템의 출력이 적절히 제어되고 있다.

Fig. 4 는 구동기의 시상수(time constant)가 5 인 경우의 응답을 보여준다. (21)에서 보인 바와 같이 구동기의 응답이 빠르면 입/출력 제어기의 안정성에 영향을 주지 않는다는 사실을 보여준다.

그러나 빠른 구동기 동역학이 제안한 입/출력 선형화 제어기의 안정성은 무조건 보장되지는 않는다. 구동기 동역학을 정적 되먹임의 형태로

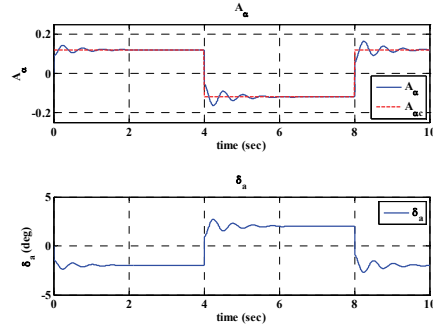


Fig. 3 Response of the DSRV under 1st order LPF for $\delta_a = \delta_e$

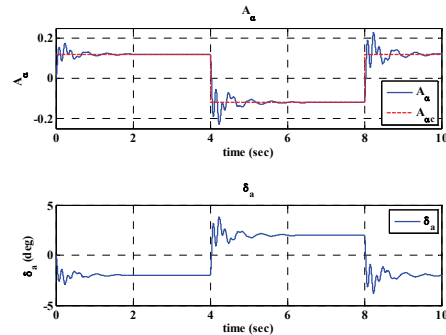


Fig. 4 Response of the DSRV under 1st order LPF at $\tau_c = 5$

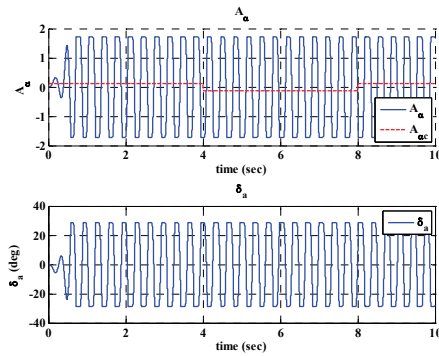


Fig. 5 Response of the DSRV under 2nd order LPF

제어기를 구성할 수 있는 경우는 (21)에서 보인 1 차 저역 통과 필터의 경우에서만 성립한다. 구동기 동역학이 2 차 저역 통과 필터의 형태를 지닐 경우에는 구동기의 동역학이 빨라짐에 따라 pitch 동역학과 연성으로 불안정한 극점이 발생할 수도

이다. Fig. 5 는 2 차 저역 통과 필터의 형태를 갖는 구동기로 인한 불안정성을 보여준다.

6. 토의

이 연구에서는 수중 운동체의 상하동요 성분과 종동요 성분의 응답이 시간적으로 서로 다른 특성을 지닌다는 점에 착안하여 특이 섭동법을 이용하여 서로 다른 두 운동으로 분리하여 제어기를 구성하는 방법을 제시하였다. 이를 위한 조건으로 전진속도와 방향타에 의한 상하/종동요 방향으로 발생하는 힘의 비가 충분히 클 경우에 이러한 분리가 가능하다는 것을 보였다. 이 연구에서는 방법의 일반성을 제시하기 위하여 특정한 제어기를 상정하지 않았다. 때문에 두 운동성분을 분리하기 위한 ε 조건을 특정할 수는 없다. 하지만 실제적으로 그러한 설계 조건의 존재성은 보장된다. 전진속도가 크고 방향타가 질점에서 멀리 떨어지도록 하여 종동요를 위한 모멘트팔을 키울수록 이 연구에서 제안하는 방법의 결과가 잘 맞을 것으로 판단된다.

이 방법을 이용하여 입/출력 되먹임 선형화 제어기를 적절하게 설계하면 입/출력 제어기가 최소 위상 시스템이 되어 유체 동역학의 역함수를 이용한 제어기를 구성할 수 있었다. 그리고 수중운동체에 적용하는 입/출력 제어기가 항상 최소 위상 시스템으로 설계할 수 있음을 보였다. 제안한 입/출력 선형화 제어기는 1 차 저역 통과 필터의 경우 구동기 동역학이 빨라지면 항상 제어기의 안정성에 영향을 받지 않았다. 많은 경우 구동기 동역학이 빠르면 제어기를 구동기 동역학을 무시한 정적 되먹임 형태로 놓고 제어기를 구성할 수 있다.

드문 경우이지만 구동기 동역학이 제어기의 안정성에 영향을 주기도 한다. 시뮬레이션에서 구동기 동역학이 2 차 저역 통과 필터의 형태를 갖는 경우에는 구동기의 동역학이 빨라지면 오히려 제어기의 안정성이 깨질 수 있음을 확인하였다. 다행히도 선박이나 잠수함의 경우 구동기 동역학이 1 차 시스템의 형태를 갖는 경우가 많다. 하지만 구동기 동역학이 정확하게 1 차 시스템의 형태를

갖지 않는 경우도 존재할 수 있다. 따라서 제안한 입/출력 선형화 제어기법을 수중 운동체에 적용하기 위해서는 구동기 동역학을 포함한 동적 되먹임 시스템의 안정성을 확인하고 적용하여야 한다. 그런 점에서 향후 다양한 구동기 동역학에 관한 연구가 요구된다.

7. 결론

이 논문에서는 수중 운동체의 상하 운동 성분과 종동요 성분을 특이 섭동법을 이용한 다중 시간 전개법으로 분리할 수 있다는 사실을 보였다. 그리고 이를 이용하여 입/출력 제어기를 구할 수 있으며, 설계된 입/출력 제어기는 항상 최소 위상 시스템이 되어 출력 되먹임 선형화 제어기를 설계할 수 있음을 보였다.

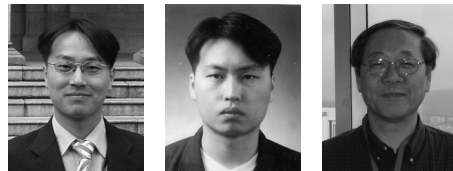
후 기

이 논문은 서울대학교 BK21 해양기술인력양성 사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Abkowitz, M.A., 1969, Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, M.I.T. Press, USA.
- Bae, J.Y., Sohn, K.H., Kwon, H.K. and Lee, S.K., 2007, "A Study on Changes in Appendage Design for Improvement of Dynamic Stability of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle," Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 323-331.
- Bhatta, P. and Leonard, N.E., 2004, "A Lyapunov Function for Vehicles with Lift and Drag: Stability of Gliding," Proc. of the 43th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 4101-4106.
- Cha, D., Choi, J.Y. and Seo, J.H., 2004, "Compensation of Actuator Dynamics in Nonlinear Missile Control," IEEE trans. on Control Systems Technology, Vol. 12, No. 4,

- pp. 620–626.
- Choi, J.H., Yeo, D.J., Rhee, K.P. and Park, J.Y., 2006, “ On the Vertical Plane Dynamics Modeling and Depth Control of a Submerged Body Moving beneath Free Surface,” *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 6, pp. 647–655.
 - Fossen, T.I., 2002, *Marine Control Systems, Marine Cybernetics*, Norway.
 - Healey, A.J., 1992, *Marine Vehicle Dynamics Lecture Notes and Problem Sets*, Naval Postgraduates School, Monterey, CA.
 - 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. 19, No. 3, pp. 327–339.
 - Huang, J. Lin, C.F., Cloutier, J.R., Evers, J.H. and D’ Souza, C., 1992, “ Robust Feedback Linearization Approach to Autopilot Design,” *Proc. of IEEE Conf. on Control Application*, 1, pp. 220–225.
 - Jang, J.H. and Park, W.G., 2006, “ The Variation of Flow Field and Hydrodynamic Coefficients of Submarine by Changes of Angle of Attack and Yaw Angle,” *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 4, pp. 460–466.
 - Khalil, H.K., 2002, *Nonlinear System 3rd Ed.*, Prentice Hall, USA.
 - Kokotovic, P., Khalil, H. K. and O’ Reilly, J., 1999, *Singular Perturbation Methods in Control: analysis and Design*, SIAM, USA.
 - Lee, J.I. and Ha, I.J., 1999, “ Autopilot Design for Highly Maneuvering STT Missiles via Singular Perturbation-like Techniques,” *IEEE trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, pp. 466–477.
 - Lin, C.F., 1994, *Advanced Control System Design*, Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, USA.
 - McGooking, E.W., Murray-Smith, D.J., Lin, Y. and Fossen, T.I., 2000, “ Experimental Results from Supply Ship Autopilot Optimisation Using Genetic Algorithms,” *Trans. of the Institute of Measurement and control TIMC-22(2)*, pp. 141–178.
 - Oh, J.H. and Ha, I.J., 1997, “ Missile Autopilot Design via Functional Inversion and Time-scaled Transformation,” *IEEE trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 33, pp. 64–76.
 - Romano, J.J. and Singh, S.N., 1990, “ I–O Map Inversion, Zero Dynamics and Flight Control,” *IEEE trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, pp. 1022–1028.
 - Seol, D.M., Rhee, K.P. and Yeo, D.J., 2005, “ An Experimental Study of the Submerged Depth Effect on the Manoeuvrability in a Horizontal Plane of an Underwater Vehicle,” *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 6, pp. 551–558.
 - Son, K.H., Lee, S.K. and Ha, S.P., 2006, “ Mathematical Model for Dynamics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with Six Degree of Freedom and Characteristics of Manoeuvrability Response,” *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 4, pp. 399–413.
 - Yeo, D.J., Yoon, H.K., Kim, Y.G. and Lee, C.M., 2006, “ Sensitivity Analysis on the Stability of a Submarine Concerning its Design Parameters,” *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 4, pp. 521–528.



< 조 경 남 > < 서 동 철 > < 최 항 순 >