

퍼지 게인 스케줄링을 이용한 자율 무인 잠수정의 자세 제어

Motion Control of an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) Using Fuzzy Gain Scheduling

박 랑 은, 황 은 주, 이 희 진, 박 민 용*
(Rang-eun Park, Eun Ju Hwang, Heejin Lee, and Mignon Park)

Abstract: The problem of motion control for AUV (Autonomous Underwater Vehicles) is addressed. The utilization of such robotic vehicles has gained an increasing importance in many marine activities. In this paper the objective is to describe how to design and apply FGS (Fuzzy Gain Scheduling) PD (Proportional Derivative) controller for an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) to control the yaw and depth of the vehicle by keeping the path of the navigation to a desired point, and/or changing the path according to a set point.

Keywords: AUV, fuzzy gain scheduling, motion control, 6-degree of freedom, yaw and depth control

I. 서론

최근 해양산업의 발전과 더불어 자율 주행하는 무인 잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)의 필요성과 기술 개발이 더욱 증대되고 있는 추세이다[1]. 뿐만 아니라 군사적 목적으로는 정찰, 기뢰탐지 및 제거 등 많은 쓰임새를 가지고 있기 때문에 AUV는 높은 안정성과 신뢰성을 확보하여야 한다. 본 논문에서는 한국해양연구원에서 개발한 ‘이심이(ISIMI, Integrated Submergible Intelligent Mission Implementation) AUV’의 모델에서 퍼지논리를 이용하여 PD 제어기의 게인들을 결정하여 AUV의 수평방향 및 심도 제어를 수행한다. 이는 미리 규정된 영역 내에서 퍼지 규칙과 추정에 의해 제어기의 파라미터가 on-line-으로 결정되기 때문에 외란이나 시스템의 모델링 오차가 존재하는 경우에도 좋은 제어 결과를 기대할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 게인 스케줄링 PD 제어기의 설계와 시뮬레이션의 모의실험을 통한 검증은 목표로 하여 이심이 모델의 기존 PD 제어기[2]와 응답특성을 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 자율 무인 잠수정 모델에 대하여 설명하고, III 장에서는 퍼지게인 스케줄링 기법을 이용한 제어기를 설계한다. IV 장에서는 시뮬레이션을 통해 PD제어기와 응답특성을 비교하며, 마지막 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 자율 무인 잠수정 모델

1. 시스템 식

AUV의 운동해석모델은 6자유도의 비선형 방정식으로 표시 할 수 있다. 이러한 운동에서 지표고정좌표계(earth-

fixed coordinate system)와 선체고정좌표계(body-fixed coordinate system)를 사용하면 편리하다. 이 때 모델링의 단순화를 위하여 사용된 좌표축과 명칭은 그림 1과 표 1에 나타내었다[3].

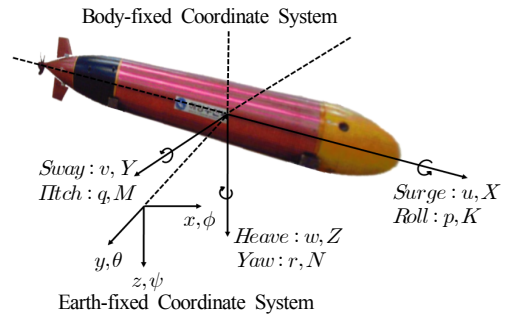


그림 1. AUV의 좌표축.

Fig. 1. Coordinate system of AUV.

표 1. AUV의 좌표축 명칭.

Table 1. The notation for AUV.

DOF		Forces [N]	Linear Velocity [m/s]	Position [m]
1	Motion in the x-direction (surge)	X	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	Y	v	y
3	Motion in the z-direction (heave)	Z	w	z
DOF		Moments [Nm]	Angular Velocities [rad/s]	Euler Angles [rad]
4	Rotation about the x-axis (roll, heel)	K	p	ϕ
5	Rotation about the y-axis (pitch, trim)	M	q	θ
6	Rotation about the z-axis (yaw)	N	r	ψ

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 28., 수정: 2009. 12. 5., 채택확정: 2010. 4. 2.
박랑은, 황은주, 박민용: 연세대학교 전기전자공학과
(hipparchos@naver.co.kr/garung@yeics.yonsei.ac.kr/mignpark@yonsei.ac.kr)

이희진: 국립한경대학교 정보제어공학과 & IT융합기술연구소
(lhjin@hkn.ac.kr)

오일러 각 변환에 의한 변환 관계는 다음과 같다[4].

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1)$$

이 때 $\eta = [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T$, $\eta_1 = [x \ y \ z]$, $\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]$ 는 지표 고정 좌표계에 대한 위치 벡터 및 각 회전 벡터를 나타내고, $v = [v_1 \ v_2]$, $v_1 = [u \ v \ w]$, $v_2 = [p \ q \ r]$ 는 선체고정 좌표계에 대한 선속도 벡터와 각속도 벡터를 나타 내며 $J(\eta)$ 는 다음과 같다.

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta - s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta c\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

s , c , t 는 각각 \sin , \cos , \tan .

이 때 $J_1(\eta_2)$ 는 선체고정좌표계의 선속도벡터를 지구고정좌표계의 선속도로 변환하는 오일러 각회전 변환 행렬이다. $J_2(\eta_2)$ 는 선체고정 좌표계의 각속도벡터를 지구고정좌표계의 각속도벡터로 변환하는 오일러 각 변환 행렬이다. 식 (1)은 지표 고정좌표계에 대한 선체고정좌표계의 상대각도를 X-Y-Z 오일러 각도를 통해 표현한 것이다.

여기서 $\theta = \pm 90^\circ$ 에서는 $J_2(\eta_2)$ 가 정의되지 않는 특이점이나 잠수정의 Pitch가 $\pm 90^\circ$ 가 되는 경우는 거의 없으므로 무시한다[2].

또한 본 논문에서는 6자유도 잠수정의 동역학적 모델은 정리된 다음식을 이용하였다[4].

$$M\dot{v} = F_{CC} + F_{DL} + F_{rest} + F_{thrust} + F_{fin} \quad (5)$$

$v = [\dot{v}_1^T \ \dot{v}_2^T]^T$ 에서 $\dot{v}_1 = [\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w}]^T$ 은 선가속도 벡터이고, $\dot{v}_2 = [\dot{p} \ \dot{q} \ \dot{r}]^T$ 은 각가속도 벡터, F_{CC} 는 전향력 및 구심력 벡터, F_{DL} 은 유체 저항 및 양력, F_{rest} 는 복원력 벡터, F_{thrust} 는 추진력 벡터, F_{fin} 은 제어판 입력 벡터, M 은 부가질량을 포함하는 시스템 관성행렬이다. 이러한 모델들에 관한 각 항들은 다음과 같다[5,6].

- 전향력 및 구심력 벡터

$$F_{CC} = [X_{CC} \ Y_{CC} \ Z_{CC} \ K_{CC} \ M_{CC} \ N_{CC}]^T \quad (6)$$

$$X_{CC} = mvr - mqv - my_G pq - mz_G pr + mx_G \dot{q}^2 + mx_G \dot{r}^2 \quad (7)$$

$$Y_{CC} = -mur + mwp - mx_G qp - mz_G qr + my_G \dot{p}^2 + my_G \dot{r}^2 \quad (8)$$

$$Z_{CC} = muq - mvp + mx_G rp - my_G rq + mz_G \dot{p}^2 + mz_G \dot{q}^2 \quad (9)$$

$$K_{CC} = my_G auq + mz_G ar - my_G vp - mz_G wp - (I_z - I_y)qr + I_{yx} \dot{q}^2 - I_{yx} r^2 pq - I_{xy} pr \quad (10)$$

$$M_{CC} = mz_G vr + mx_G vp - mx_G uq - mz_G wq - (I_x - I_z)rp - I_{zx} \dot{p}^2 - I_{yz} pq + I_{xy} qr + I_{zx} r^2 \quad (11)$$

$$N_{CC} = -mx_G ur - my_G vr + my_G wq + mx_G vp - (I_y - I_x)pq + I_{xy} \dot{p}^2 - I_{xy} \dot{q}^2 + I_{yz} rp - I_{zx} rq \quad (12)$$

- 유체저항 및 양력 벡터

$$F_{DL} = [X_{DL} \ Y_{DL} \ Z_{DL} \ K_{DL} \ M_{DL} \ N_{DL}]^T \quad (13)$$

$$X_{DL} = \frac{\rho}{2} l^2 (X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2) + \frac{\rho}{2} l^4 (X_{qq} q^2 + X_{rr} r^2) \quad (14)$$

$$Y_{DL} = \frac{\rho}{2} l^2 (Y_v v Y_{vv} v|v|) + \frac{\rho}{2} l^3 Y_r r \frac{\rho}{2} l^4 Y_{r|r} r|r| \quad (15)$$

$$Z_{DL} = \frac{\rho}{2} l^2 (Z_{vv} v^2 + Z_{ww} w + Z_{w|w|} w|w|) + \frac{\rho}{2} l^3 Z_q q + \frac{\rho}{2} l^4 Z_{q|q|} q|q| \quad (16)$$

$$K_{DL} = \frac{\rho}{2} l^3 K_v v \frac{\rho}{2} l^4 K_r r + \frac{\rho}{2} l^5 K_{r|r} r|r| \quad (17)$$

$$M_{DL} = \frac{\rho}{2} l^3 (M_{vv} v^2 + M_{ww} w + M_{w|w|} w|w|) + \frac{\rho}{2} l^4 M_q q + \frac{\rho}{2} l^5 M_{q|q|} q|q| \quad (18)$$

$$N_{DL} = \frac{\rho}{2} l^3 (N_v v + N_{v|v|} v|v|) + \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^5 N_{r|r} r|r| \quad (19)$$

- 복원력 벡터

$$F_{rest} = \begin{bmatrix} -(W-B)s\theta \\ (W-B)c\theta s\phi \\ (W-B)c\theta c\phi \\ (y_G W - y_B B)c\theta c\phi - (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta c\phi - (z_G W - z_B B)s\theta \\ (x_G W - x_B B)c\theta s\phi + (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

- 추진력 벡터

$$F_{thrust} = [X_t \ Y_t \ Z_t \ K_t \ M_t \ N_t]^T \quad (21)$$

$$X_t = \frac{\rho}{2} l^2 (a_X + b_X u_T + c_X u_T^2 + d_X u_T^3) \quad (22)$$

$$Y_t = Z_t = M_t = N_t = 0 \quad (23)$$

$$K_{thrust} = \frac{\rho}{2} l^2 (a_K + b_K u_T + c_K u_T^2 + d_K u_T^3) \quad (24)$$

$$u_T = \frac{u_0 n_i}{n_0 u} - 1 \quad \text{여기서, } i = 1, 2, 3, 4.$$

u_0 , n_0 는 각각 프로펠러 설계속도 및 설계 회전수, u 는 전진속도, n_i 는 프로펠러 실제 회전수이다. 또한, X_t 는 X방향의 선속도를 가지는 추진력이고, K_t 는 스러스트 작용에 의해 생기는 roll 방향 모멘트이다. 여기서 a_X , b_X , c_X , d_X 는 각 차수에 대한 X방향 추력계수, a_K , b_K , c_K , d_K 는 각 차수에 대한 K방향 추력계수이다.

- 제어판 입력 벡터

$$F_{fin} = [X_{fin} \ Y_{fin} \ Z_{fin} \ K_{fin} \ M_{fin} \ N]{}^T \quad (25)$$

$$X_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 X_{\delta_R} \delta_R \quad (26)$$

$$Y_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 Y_{\delta_R} \delta_R \quad (27)$$

$$Z_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 Z_{\delta_S} \delta_S \quad (28)$$

$$K_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 K_{\delta_{SS}} \delta_{SS} - \frac{\rho}{2} l^3 u^2 K_{\delta_{SP}} \delta_{SP} \quad (29)$$

$$M_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_S} \delta_S \quad (30)$$

$$N_{fin} = \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \delta_R \quad (31)$$

- 관성행렬 벡터

$$M = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2} l^3 X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - \frac{\rho}{2} l^3 Y_v & 0 \\ 0 & 0 & m - \frac{\rho}{2} l^3 Z_w \\ 0 & 0mz_G - \frac{\rho}{2} l^4 K_v & my_G \\ mz_G & 0 & -mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 M_w \\ -my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_r & 0 \\ 0 & mz_G & -my_G \\ -mz_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_p & 0 & mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_r \\ my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 Z_q & 0 \\ I_x - \frac{\rho}{2} l^5 K_p & -I_{xy} & -I_{zx} + \frac{\rho}{2} l^5 K_r \\ -I_{xy} & I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q & -I_{yz} \\ -I_{zx} - \frac{\rho}{2} l^5 K_r & I_{yz} & I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r \end{bmatrix} \quad (32)$$

2. 잠수정 모델의 선형화

앞 절에서 구한 모델은 평형점 근방에서 선체의 큰 교란이 없다는 가정 하에 선형화 할 수 있다. 따라서 각도와 각 속도에 대한 각 축상의 초기 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_0 = \theta_0 = \psi_0 &= 0 \\ p_0 = q_0 = r_0 &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

선속도는 전진방향의 속도만이 존재하므로 다음과 같다.

$$u_0 = U(\text{constant}), v_0 = w_0 = 0 \quad (34)$$

2.1 수평 모델의 선형화

수평 모델은 선체가 XY평면상으로만 움직이므로 Z축 방향의 선속도와 가속도는 없고 Y축상의 모멘트인 pitch 방향의 각속도 또한 존재하지 않으며 횡동요가 없다고 가정한 모델이므로 식 (35)과 같은 구속조건이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{z} = w &= 0 \\ \dot{\theta} = q &= 0 \\ \dot{\phi} = p &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

선체고정좌표계와 지표고정좌표계의 관계는 그림 2에서 보이며 식 (36)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (36)$$

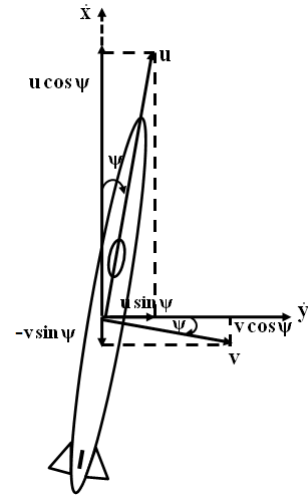


그림 2. 수평 모델에서의 좌표계 변환 관계.

Fig. 2. Transformation of coordination on horizontal model.

이 때 ψ 가 작다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin \psi &\approx \psi \\ \cos \psi &\approx 1 \end{aligned} \quad (37)$$

따라서 식 (36)에 식 (37)을 대입하고 식 (35)와 함께 정리하면 다음과 같은 기구학적 수평모델을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u - v\psi \\ \dot{y} &= u\psi + v \\ \dot{z} &= w = 0 \\ \dot{\theta} &= q = 0 \\ \dot{\phi} &= p = 0 \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (38)$$

동역학적 수평모델은 6자유도 운동방정식 중 N방향 힘에 대한 식에서 부력중심을 선체좌표축의 원점으로 하고 무게중심은 z축 위에 위치한다고 가정한다.

또한, 교차유동항 I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} 는 관성모멘트 I_x, I_y, I_z 에 비해 영향이 미미하므로 무시하고 영이 되는 항들과 교차항들 또한 무시하여 [부록 A.1]의 6자유도 운동방정식 중 N방향 힘을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & -my_G \dot{u} + (mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_r) \dot{v} + (-I_{zx} - \frac{\rho}{2} l^5 K_r) \dot{p} - I_{yz} \dot{q} + (I_z - \frac{\rho}{2} N_r) \dot{r} \\ & = -mz_G ur - my_G vr + my_G wq + mz_G wp - (I_y - I_x) pq + I_{xy} p^2 - I_{xy} q^2 \\ & + I_{yz} rp - I_{zx} qr + \frac{\rho}{2} l^3 (N_v v + N_{|v|} |v|) + \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^5 N_{|r|} |r| \\ & + (x_G W - x_B B) \theta s \phi + (y_G W - y_B B) s \theta \\ & + 0 \\ & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \delta_R \end{aligned} \quad (39)$$

식 (38)에서 $\dot{\psi} = r$ 이므로 식 (39)를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r) \dot{r} &= \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \delta_R \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (40)$$

이를 일반적인 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^4 N_r & 0 \\ I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \\ I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r \end{bmatrix} \delta_R \quad (41)$$

$$y = [0 \ 1] \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix}$$

2.2 수직 모델의 선형화

선체가 XZ 평면상으로만 움직인다면 Y축 방향의 선속도와 가속도는 없고 Z축 상의 모멘트인 yaw방향의 각속도 역시 존재하지 않으며, 횡동요가 없다고 가정할 모델이므로 다음과 같은 구속조건이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{y} &= v = 0 \\ \dot{\psi} &= r = 0 \\ \dot{\phi} &= p = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

한편, 선체고정좌표계와 지표고정좌표계와의 관계는 그림 3에서 보이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{z} &= -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \quad (43)$$

θ 가 작다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sin \theta \approx \theta, \quad \cos \theta \approx 1 \quad (44)$$

따라서 식 (43)에 식 (44)를 대입하고 식 (42)와 함께 정리하면 식 (45)와 같은 기구학적 수직모델을 얻는다.

동역학적 수직모델은 6자유도 운동방정식 중 M방향 힘에 대한 식에서 부력중심을 선체좌표축의 원점으로 하고 무게중심은 Z축 위에 위치한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u + w\theta \\ \dot{y} &= v = 0 \\ \dot{z} &= -u\theta + w \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{\phi} &= p = 0 \\ \dot{\psi} &= r = 0 \end{aligned} \quad (45)$$

또한, 교차유동항들은 무시하며 θ 가 미소변화하고 0인 항들과 고차항들을 무시하여 [부록 A.1]의 6자유도 운동방정식 중 M방향 힘을 정리하면 다음과 같다.

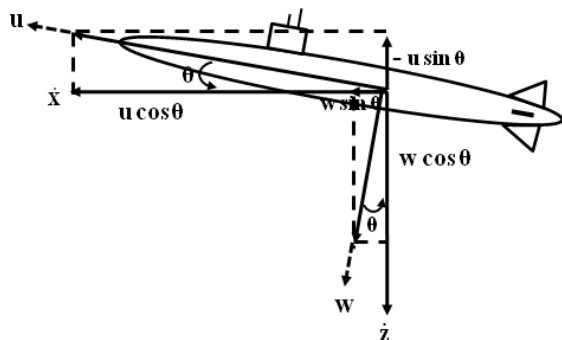


그림 3. 수직 모델에서의 좌표계 변환 관계.
Fig. 3. Transformation of coordination on vertical model.

$$\begin{aligned} & m z_G \dot{u} + (-m x_G - \frac{\rho}{2} l^4 M_w) \dot{\psi} - I_{xy} \dot{p} + (I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) \dot{q} - I_{yz} \dot{r} \\ &= m z_G \dot{v} + m x_G \dot{v} p - m x_G \dot{u} q - m z_G \dot{u} q - (I_x - I_z) \dot{p} - I_{xz} \dot{v}^2 - I_{yz} p q \\ &+ I_{xy} \dot{q} r + \frac{\rho}{2} l^3 (M_{vv} v^2 + M_{ww} w + M_{vw} w v) + \frac{\rho}{2} l^4 M_q q + \frac{\rho}{2} l^5 M_{qq} q \dot{q} \\ &- (x_G W - y_G B) \theta \dot{\phi} - (z_G W - y_G B) s \theta \\ &+ 0 \\ &+ \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_s} \delta_s \end{aligned} \quad (46)$$

식 (46)과 식 (45)에서 미소한 w 를 무시하면 식 (47)로 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} (I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) \dot{q} &= (\frac{\rho}{2} l^4 N_q) q - z_G W \theta + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_s} \delta_s \\ \dot{z} &= -u \theta \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \quad (47)$$

이를 일반적인 상태방정식형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^4 N_q & 0 & 0 \\ I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q & -z_G W & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (48)$$

$$y = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix}$$

III. 퍼지 개인 스케줄링에 의한 PD 제어기 설계

1. PD 제어기의 설계

1.1 수평 모델 제어기 설계

식 (40)에서 러더의 변위에 따른 yaw각을 이용하여 개루프 전달함수를 구하면 식 (49)와 같으며 블록 선도는 그림 4와 같다.

$$G_h = \frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{\frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R}}{s \left\{ s \left(I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r \right) - \frac{\rho}{2} l^4 N_r \right\}} \quad (49)$$

PD 제어기는 다음과 같다.

$$\delta_R = K_p e_\psi + K_D \dot{e}_\psi, \quad e_\psi = \psi_r - \psi \quad (50)$$

- ψ_r : 목표 yaw 각
- K_p : 횡동요 비례 게인
- K_D : 횡동요 미분 게인

PD 제어기를 포함하는 개루프 전달함수는 다음과 같다.

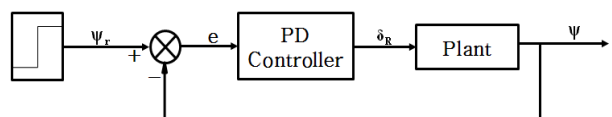


그림 4. PD 제어 시스템.

Fig. 4. PD control system.

$$G_h = \frac{\psi}{\delta_R} = \frac{\frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} (K_p + K_d s)}{s \left\{ (I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r) - \frac{\rho}{2} l^4 N_r \right\}} \quad (51)$$

폐루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$T_h = \frac{\psi}{\psi_r} = \frac{\frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} (K_p + K_d s)}{(I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r) s^2 + (\frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} K_d - \frac{\rho}{2} l^4 N_r) s + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} K_p} \quad (52)$$

식 (51)과 식 (52), 그리고 [부록 A.2]의 유체계수에 의하여 수평모델의 개루프와 폐루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_h = \frac{\psi}{\delta_R} = \frac{-4.2603(K_p + K_d s)}{s(s + 2.1197)} \quad (53)$$

$$T_h = \frac{\psi}{\psi_r} = \frac{-4.2603(K_p + K_d s)}{s^2 + (2.1197 - 4.2603K_d)s - 4.2603K_p} \quad (54)$$

1.2 수직모델 제어기 설계

식 (47)을 이용하여 스티븐각에 대한 심도의 개루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_{depth} = \frac{z(s)}{\delta_s(s)} = \frac{-\frac{\rho}{2} l^3 U^3 M_{\delta_s}}{s \left\{ s^2 (I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) - \frac{\rho}{2} l^4 M_q s + z_G W \right\}} \quad (55)$$

PD 제어기는 다음과 같다.

$$\delta_s = K_p e_z + K_D \dot{e}_z, \quad e_z = z_r - z \quad (56)$$

z_r : 목표 depth 각

K_p : 중동요 비례 게인

K_D : 중동요 미분 게인

PD 제어기를 포함하는 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{depth} = \frac{z(s)}{\delta_s(s)} = \frac{-\frac{\rho}{2} l^3 U^3 M_{\delta_s} (K_p + K_d s)}{s \left\{ s^2 (I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) - \frac{\rho}{2} l^4 M_q s + z_G W \right\}} \quad (57)$$

폐루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$T_{depth} = \frac{-\frac{\rho}{2} l^3 U^3 M_{\delta_s} (K_p + K_d s)}{(I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) s^3 - \frac{\rho}{2} l^4 M_q s^2 + (z_G W - \frac{\rho}{2} l^3 U^3 N_{\delta_s} K_d) s - \frac{\rho}{2} l^3 U^3 M_{\delta_s} K_p} \quad (58)$$

식 (57)과 식 (58), 그리고 [부록 A.2]의 유체계수에 의한 수직모델의 개루프와 폐루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{depth} = \frac{z}{\delta_s} = \frac{4.2603(K_p + K_d s)}{s(s^2 + 2.1197s + 1.7383)} \quad (59)$$

$$T_{depth} = \frac{z}{z_r} = \frac{4.2603(K_p + K_d s)}{s^3 + 2.1197s^2 + (4.2603K_d + 1.7383)s + 4.2603K_p} \quad (60)$$

2. 퍼지 게인 스케줄링

그림 5는 퍼지 게인 스케줄링을 이용한 PD 제어 시스템으로 이 방법은 제어기 파라미터를 결정하는 게인 스케줄링을 퍼지 논리에 의하여 수행하는 것이다[7].

이 게인 스케줄링의 퍼지 제어 규칙은 다음과 같다.

If $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_i (61)

then K_p' is C_i , K_d' is D_i , $i = 1, 2, 3, \dots, m$

여기서 A_i , B_i , C_i , D_i 는 퍼지 집합이다.

K_p , K_d 는 $[K_{pmin}, K_{pmax}]$, $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ 에 의해 미리 규정된 영역 내에 존재한다고 가정한다. 편리를 위해 K_p , K_d 는 식 (62)의 선형 변형 영역에서 식 (61)의 제어기 파라미터들을 정규화 시킨다.

$$K_p' = (K_p - K_{pmin}) / (K_{pmax} - K_{pmin})$$

$$K_d' = (K_d - K_{dmin}) / (K_{dmax} - K_{dmin}) \quad (62)$$

식 (62)의 PD 제어기 파라미터들은 식 (63)과 같이 고쳐지므로 퍼지 논리에 의해 얻어진 K_p' , K_d' 을 식 (63)에 대입하여 PD제어기의 실제 파라미터들을 출력할 수 있다.

$$K_p = (K_{pmax} - K_{pmin}) K_p' + K_{pmin}$$

$$K_d = (K_{dmax} - K_{dmin}) K_d' + K_{dmin} \quad (63)$$

퍼지 시스템의 input은 $e(t), \dot{e}(t)$ 이며, 입력성분에 대한 소속함수는 삼각형태로 그림 6과 같으며 그림 7은 출력 측 멤버십 함수 형태를 나타내고 있다. 이 때, K_p, K_d 의 최대,

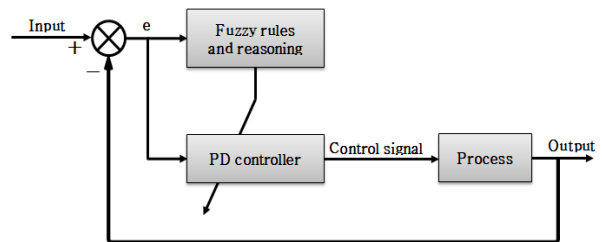


그림 5. 퍼지 게인 스케줄링을 이용한 PD 제어 시스템.

Fig. 5. PD control system using fuzzy gain scheduling.

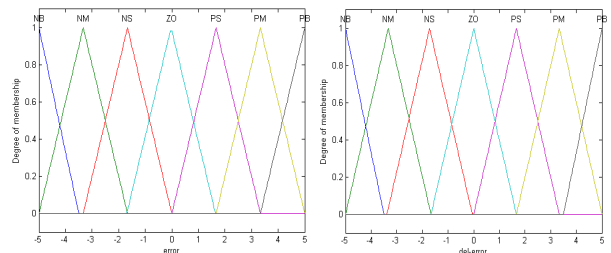


그림 6. 입력 멤버십 함수.

Fig. 6. Input membership function.

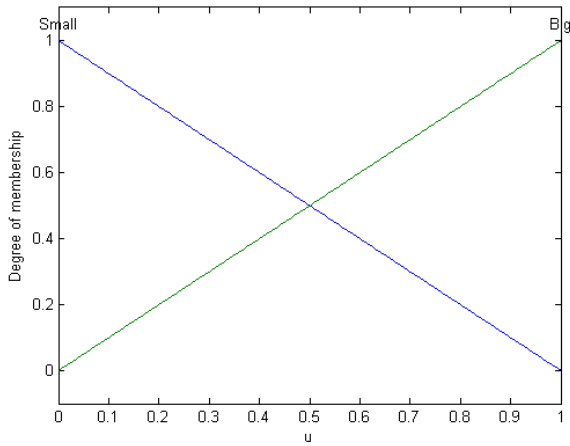


그림 7. K_p', K_d' 에 대한 출력 멤버십 함수.

Fig. 7. Output membership function K_p, K_d .

표 2. K_p' 에 대한 퍼지 추론.

Table 2. Fuzzy tuning rules for K_p' .

Δe \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	S	S	S	S	S	B
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	B	S	S	S	S	S	B

표 3. K_d' 에 대한 퍼지 추론.

Table 3. Fuzzy tuning rules for K_d' .

Δe \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	B	B	B	B	B	S
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	S	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	S	B	B	B	B	B	S

최소값들은 Routh-Hurwitz 안정도 판별법에 의하여 구한 PD 제어기의 파라미터 값에 기준하여 AUV 모델의 선형화 된 식에 맞게 최대값을 적정한 값으로 정하였고, 최소값들은 이 최대값들에 준하여 실험적으로 선정하였다.

입력에 대한 출력의 제어 규칙은 표 2와 표 3과 같다.

이 때 언어값의 라벨들은 P는 Positive, N은 Negative, ZO는 Zero, B는 Big, M은 Medium 그리고 S는 Small로 정의된다.

퍼지 추론법으로는 Mamdani에 의해 제안된 Max-Min 합성법[7]을 이용하였고, 비퍼지화 방법으로는 출력 퍼지집합의 무게 중심을 구하여 그에 해당하는 값을 출력값으로 하는 무게중심법[7]을 이용하였다.

IV. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 사용한 AUV 잠수정은 한국해양 연구원에서 개발한 ‘이십이’ AUV의 모델로 기존의 PD 제어에 퍼지 게인 스케줄링을 이용하여 응답 특성을 더 좋게 하고자 하였다.

1. 수평 모델 제어

퍼지 소속함수를 이용하여 계단입력의 크기에 따라 자동으로 이득을 변경하는 퍼지 게인 스케줄링 기법을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

Routh-Hurwitz 안정도 판별법을 사용하여 $K_{pmax} = -3.5$, $K_{pmin} = -4.4$, $K_{dmax} = 0.2$, $K_{dmin} = -2.6$ 을 실험적으로 선정하였다.

제어기 파라미터들을 0과 1사이로 정규화 시켜 다음과 같이 변환하면,

$$K_p' = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} = \frac{K_p - (-4.4)}{-3.5 - (-4.4)} = \frac{K_p + 4.4}{0.9} \quad (64)$$

$$K_d' = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} = \frac{K_d - (-0.2)}{-0.8 - (-2.6)} = \frac{K_d + 0.2}{1.8} \quad (65)$$

따라서 $K_p = 0.9K_p' - 4.4$, $K_d = 1.8K_d' - 0.2$ 이다.

이 파라미터 범위를 사용하여 yaw각이 0.5, 1.5, 3 radian 선회 할 경우의 PD제어와 제안된 퍼지 게인 스케줄링을 각

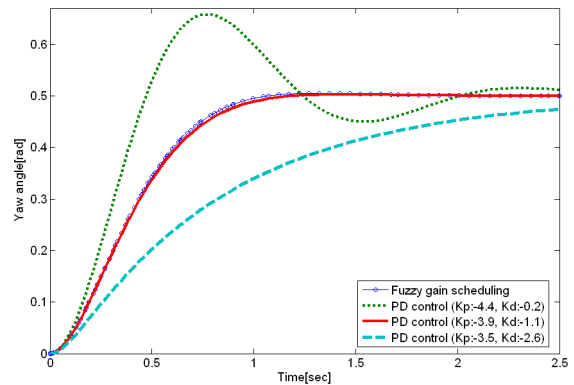


그림 8. 0.5 radian 선회 할 경우의 응답곡선.

Fig. 8. Response of horizontal model about 0.5 radian.

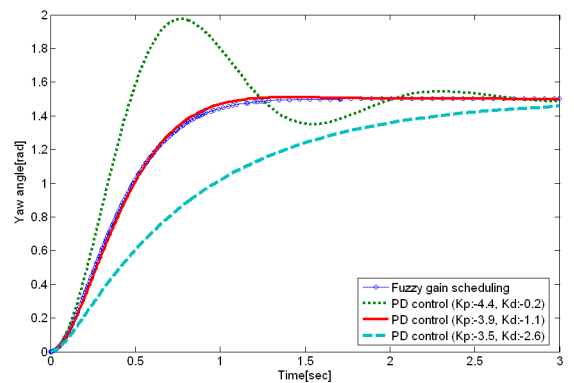


그림 9. 1.5 radian 선회 할 경우의 응답곡선.

Fig. 9. Response of horizontal model about 1.5 radian.

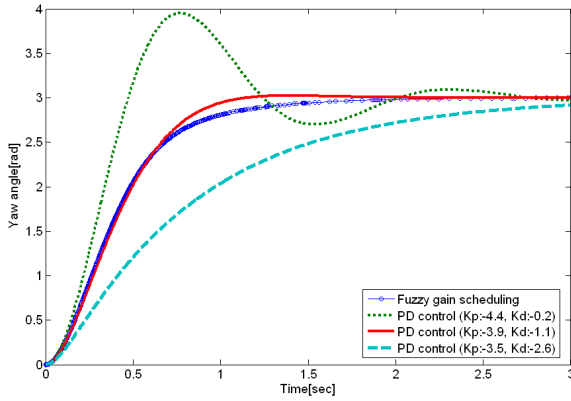


그림 10. 1.5 radian 선회 할 경우의 응답곡선.
Fig. 10. Response of horizontal model about 1.5 radian.

표 4. 수평 모델 파라미터 최종값.

Table 4. Final parameter values of horizontal model.

선회각[rad]	0.5	1.5	3
파라미터			
K_p	-3.8022	-3.8307	-3.8073
K_d	-1.0291	-1.2601	-1.73

각 비교하였다. 그림 8, 9, 10의 응답곡선에서 AUV 모델의 수평방향 제어에 있어 PD 제어 및 퍼지 게인 스케줄링 기법을 이용한 제어 모두 원하는 값으로 수렴하는 것을 알 수 있으나, 동일한 범위 내에서, PD 제어기의 경우 게인 값의 변화에 민감하여 최적의 제어성능을 찾기 어렵다. 하지만 퍼지 게인 스케줄링을 이용하였을 경우 범위 내에서 자동으로 동조됨으로써 양호한 제어 성능을 보장함을 확인할 수 있다. 퍼지 게인 스케줄링을 이용하여 제어 하였을 경우, 파라미터 최종값은 표4와 같이 나타났다.

2. 수직 모델 제어

K_p, K_d 의 범위에 대해 각각 $[K_{pmin}, K_{pmax}], [K_{dmin}, K_{dmax}]$ 라고 하자.

AUV 모델의 수직 방향 제어에서 $K_{pmax} = 0.21, K_{pmin} = 0.08, K_{dmax} = 0.06, K_{dmin} = 0.04$ 과 같이 결정된다.

제어기 파라미터들을 0과 1사이로 정규화 시켜 다음과 같이 변환하면,

$$K'_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} = \frac{K_p - 0.08}{0.21 - 0.08} = \frac{K_p - 0.08}{0.13} \quad (66)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} = \frac{K_d - 0.04}{0.06 - 0.04} = \frac{K_d - 0.04}{0.02} \quad (67)$$

따라서 $K_p = 0.13K'_p + 0.08, K_d = 0.02K'_d + 0.04$ 이다.

이 파라미터 범위를 사용하여 2, 5, 10m 깊이를 목표로 할 때 PD제어와 제안된 퍼지 게인 스케줄링의 응답곡선은 그림 11, 12, 13과 같다.

심도 제어 시에도 AUV 모델의 수평방향 제어와 같이 PD 제어 및 퍼지 게인 스케줄링 기법을 이용한 제어 모두

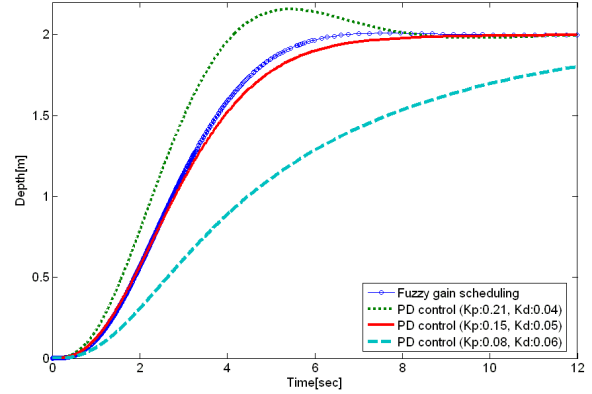


그림 11. 2 m 심도 제어 시 응답곡선.
Fig. 11. Response of vertical model about 2m.

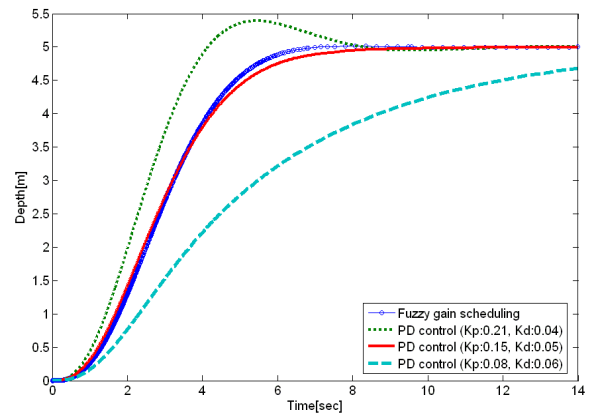


그림 12. 5 m 심도 제어시 응답곡선.
Fig. 12. Response of vertical model about 5m.

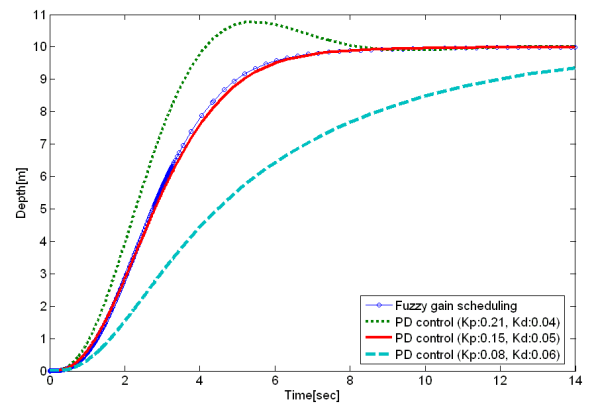


그림 13. 10 m 심도 제어 시 응답곡선.
Fig. 13. Response of vertical model about 10m.

원하는 값으로 수렴하는 것을 알 수 있으나, 동일한 범위 내에서, PD 제어기의 경우 게인 값의 변화에 민감하게 반응하였으나, 퍼지 게인 스케줄링을 이용하였을 경우 범위 내에서 자동으로 동조됨으로써 양호한 제어 성능을 보장함을 알 수 있다. 퍼지 게인 스케줄링을 이용하였을 경우, 심도 제어의 파라미터 최종값은 표 5와 같다.

표 5. 수직 모델 파라미터 최종값.

Table 5. Final parameter values of vertical model.

파라미터 \ 심도[m]	2	5	10
K_p	0.1670	0.1599	0.1460
K_d	0.0466	0.0466	0.0500

V. 결론

본 논문에서는 잠수정의 자세 제어를 위한 성능 평가로써 한국해양연구원에서 개발한 ‘이심이’ AUV 잠수정 모델에 퍼지 게인 스케줄링을 이용한 제어기와 기존의 PD 제어기와의 응답속도를 비교하였다. 이 때 잠수정의 방향 제어를 위해 6자유도 비선형 방정식을 유도하였고, 평형점 근처에서 선형화 하여 시스템 식을 도출하였으며, 퍼지 추론에서는 Mamdani 추론을 사용하였다. 그 결과 ‘이심이’ AUV의 기존 PD 제어가 게인값의 변화에 민감한 것과 달리 게인 값이 자동 동조됨으로써 제어 성능이 보장되는 결과를 얻을 수 있었다. 이에 대하여 컴퓨터 MATLAB SIMULINK를 이용하여 퍼지 게인 스케줄링 PD 제어기를 잠수정 모델에 적용한 결과 수평 모델 및 수직 모델 모두 PD 제어기보다 우수한 성능을 나타냄을 입증하였다.

참고문헌

- [1] R. L. Wernli, "AUVs-A technology whose time has come," *Proc. of Conf. UT'02 OES/IEEE*, pp. 309-314, 2002.
- [2] 박진영, "소형 무인 잠수정의 자세 제어 구현에 관한 연구," 한국과학기술원, 2005.
- [3] 전봉환, 이판목, 임용근, "항주형 AUV (자율 수중 로봇)의 기술동향," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 14-22, May, 2009.
- [4] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1994.
- [5] 마성진, 전봉환, 이판목, 김상봉, "자율무인잠수정 이심이의 선수각 및 심도 제어기 설계와 외란 특성 분석," 한국 해양 공학회 2006년도 추계 학술대회 논문집, pp. 351-354, 2006.
- [6] 전봉환, 이판목, 이계홍, 홍석원, 이지홍, "네 대의 추진기를 이용한 무인잠수정의 속도-심도 및 방위각 제어- 시뮬레이션 및 실험," 한국해양공학회지, 제19권, pp. 67-73, 2005.
- [7] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall International, Inc. 1997.

부록

A.1 AUV의 6자유도 비선형 모델

수중에서 운동하는 잠수정이 받는 힘과 모멘트의 6가지 방향에 대한 비선형 모델식은 다음과 같다.

X 방향 :

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} l^3 X_u) \dot{m} + m z_G \dot{q} - m y_G \dot{r} \\
 & = m v r - m q w - m y_G p q - m z_G p r + m x_G \dot{q}^2 + m x_G \dot{r}^2 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 (X_{v|v}|v| + X_{w|w}|w|) + \frac{\rho}{2} l^4 (X_{q|q}|q| + X_{r|r}|r|) \\
 & - (W - B) s \theta \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 (a_X + b_X u_T + x_X u_T^2 + d_X u_T^3) \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 u^2 X_{\delta_R} \delta_R
 \end{aligned}$$

Y 방향

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} l^3 Y_v) \dot{v} + (-m z_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_p) \dot{p} + (m x_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_r) \dot{r} \\
 & = -\mu r + m w p - m x_G p q - m z_G q r + m y_G p^2 + m y_G r^2 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 (Y_v v + Y_{v|v}|v|) + \frac{\rho}{2} l^3 Y_r r + \frac{\rho}{2} l^4 Y_{r|r}|r| \\
 & + (W - B) \theta s \phi \\
 & + 0 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 Y_{\delta_R} \delta_R
 \end{aligned}$$

Z 방향

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} l^3 Z_w) \dot{w} + m y_G \dot{p} + (-m x_G - \frac{\rho}{2} l^5 z_q) \dot{q} \\
 & = -\mu r + m w p - m x_G p q - m z_G q r + m y_G p^2 + m y_G r^2 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 (Z_{v|v}|v| + V|z_w w + Z_{w|w}|w|) + \frac{\rho}{2} l^3 Z_q q + \frac{\rho}{2} l^4 Z_{q|q}|q| \\
 & + (W - B) \theta \alpha \phi \\
 & + 0 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 Z_{\delta_S} \delta_S
 \end{aligned}$$

K 방향

$$\begin{aligned}
 & (-m z_G - \frac{\rho}{2} l^4 K_v) \dot{v} + m y_G \dot{w} + (I_x - \frac{\rho}{2} l^5 K_p) \dot{p} - I_{xy} \dot{q} + (-I_{xz} + \frac{\rho}{2} l^5 K_r) \dot{r} \\
 & = m y_G u q + m z_G w r - m y_G v p - m z_G \phi - (I_z - I_y) q r - I_{yx} \dot{q}^2 - I_{xy} r^2 \\
 & + I_{xz} p q - I_{xy} p r + \frac{\rho}{2} l^3 K_v v + \frac{\rho}{2} l^4 K_r r - \frac{\rho}{2} l^5 K_{r|r}|r| \\
 & + (y_G W - y_B B) \theta \alpha \phi - (z_G W - z_B B) \theta s \phi \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 (a_K + b_K u_T - c_K u_T^2 + d_K u_T^3) \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 K_{\delta_{SS}} \delta_{SS} - \frac{\rho}{2} l^3 U^2 K_{\delta_{SP}} \delta_{SP}
 \end{aligned}$$

M 방향

$$\begin{aligned}
 & m z_G \dot{u} + (-m x_G - \frac{\rho}{2} l^4 M_w) \dot{w} - I_{xy} \dot{p} + (I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q) \dot{q} - I_{yz} \dot{r} \\
 & = m z_G v r + m x_G v p - m x_G u q - m z_G w r - (I_x - I_z) r p - I_{xz} p^2 + I_{xz} r^2 \\
 & - I_{yz} p q + I_{xy} q r + \frac{\rho}{2} l^3 (M_{v|v}|v| + M_w w + M_{w|w}|w|) + \frac{\rho}{2} l^4 M_q q \\
 & + \frac{\rho}{2} l^5 M_{q|q}|q| - (x_G W - x_B B) \theta \alpha \phi - (z_G W - z_B B) s \theta \\
 & + 0 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_S} \delta_S
 \end{aligned}$$

N방향

$$\begin{aligned}
 & -m y_G \dot{u} + (m x_G - \frac{\rho}{2} l^4 Y_v) \dot{v} + (-I_{zx} - \frac{\rho}{2} l^5 K_p) \dot{p} - I_{yz} \dot{q} + (I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r) \dot{r} \\
 & = -m x_G u r - m y_G v r + m y_G a v q + m x_G \phi - (I_y - I_x) p q + I_{xy} p^2 - I_{xy} q^2 \\
 & + I_{yz} r p - I_{zx} q r + \frac{\rho}{2} l^3 (N_v v + N_{v|v}|v|) + \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^5 N_{r|r}|r| \\
 & + (x_G W - x_B B) \phi s \phi + (y_G W - y_B B) s \theta \\
 & + 0 \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta r} \delta_R
 \end{aligned}$$

A.2 AUV의 조종계수

표 1. 유차항 계수.

Table 1. Coefficient value

coefficient	value	coefficient	value
ρ	1000	c_K	0.000306
m	21.8	d_K	0.000084
g	9.806	x_B	0
W	$m \times g$	y_B	0
a_X	0	z_B	0
b_X	0.1802	I_x	0.1821
c_X	0.0012	I_y	1.8207
d_X	0.0002405	I_z	1.8207
l	1.2	x_G	0
coefficient	value	coefficient	value
B	$\rho \times d \times g$	y_G	0
d	0.0218	z_G	0.3
u	1	I_{xy}	무시가능
a_K	0	I_{yz}	무시가능
b_K	0.000236	I_{zx}	무시가능

표 2. 유체계수.

Table 2. Hydrodynamic coefficients.

X_u	-0.000887	Z_{vv}	0	M_q	-0.001502
X_{vr}	0.023685	Z_{rr}	0	M_w	0.030853
X_u	-0.000887	Z_q	-0.016100	M_w	-0.000660
X_{vr}	0.023685	$Z_{q q }$	0.003567	M_q	-0.007543
X_{wq}	-0.023685	Z_{vr}	0	$M_{q q }$	-0.001563
$X_{v v }$	-0.005991	Z_{δ}	-0.043008	M_{rp}	0.001554
$X_{w w }$	-0.005991	Z_{rp}	0.002283	$M_{\delta s}$	-0.018192
$X_{q q }$	-0.002283	$Z_{w q }$	0	M_{vp}	-0.002283
$X_{r r }$	-0.002283	Z_{vp}	-0.023685	M_{rr}	0
Y_p	0	$Z_{w w }$	-0.135039	$M_{w q }$	0
$Y_{p p }$	0	$Z_{p p }$	0	$M_{w w }$	0.011760
Y_p	0	$Z_{w q }$	-0.023535	M_{vv}	0
Y_r	0.000660	$Z_{\delta s}$	-0.043008	M_{vr}	0
$Y_{r r }$	0	K_p	-0.000005	$M_{w q }$	0
Y_v	-0.025040	K_r	0	$N_{\delta r}$	-0.018192
Y_v	-0.062586	K_v	0	N_v	0
$Y_{v v }$	-0.135039	K_p	-0.000006	N_r	-0.007543
Y_r	0.016100	K_r	0	$N_{v v }$	-0.011760
$Y_{r r }$	-0.003567	K_v	0	N_v	0.000660
$Y_{r v }$	-0.023535	K_{vq}	0	N_r	-0.001502
Y_{ϕ}	0.023685	$K_{p p }$	-0.0000002	N_{pq}	-0.001554
$Y_{\delta r}$	-0.043008	K_{wr}	0	$N_{v r }$	-0.023988
Y_{pq}	0.002283	$K_{v v }$	0	$N_{r r }$	-0.001563
Z_w	-0.025040	K_{vw}	0	$N_{v r }$	0
Z_w	-0.062586	$K_{r r }$	0	N_{ϕ}	-0.002283
Z_q	-0.000660				



박 랠 은
 2006년 한국해양대학교 기계소재공학과 졸업. 2008년~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사 & 해군 복무. 관심분야는 퍼지 이론, 지능 제어.



황 은 주
 1999년 홍익대학교 금속재료공학과 졸업. 2006년 연세대학교 전자공학과 석사. 2006년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사. 관심분야는 퍼지 이론 및 비선형제어.



이 희 진
 1987년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1989년~1993년 (주) 대우통신 종합연구소 연구원. 1993년~1995년 (주) 에스원 종합연구소 연구원. 1998년 연세대학교 전자공학과박사. 1998년~현재 국립한경대학교 정보제어공학과 교수 & IT융합기술연구소 연구원. 관심분야는 로봇틱스 및 강인제어, 지능제어.



박 민 용
 1973년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1977년 동 대학원 석사. 1977년~1982년 일본 동경대학교 의용전자 연구실. 1982년 일본 동경대학교 전자공학과 박사. 1982년 미국 MIT&BERKELEY 연구소. 1982년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 퍼지제어 및 로봇틱스, 의용전자.