

네 개의 주 추진기를 이용한 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 - 시뮬레이션 및 실험

전봉환* · 이관목* · 이계홍* · 홍석원* · 이지홍**

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**충남대학교 메카트로닉스공학과

Speed, Depth and Steering Control of Underwater Vehicles with Four Stern Thrusters - Simulation and Experimental Results

BONG-HUAN JUN*, PAN-MOOK LEE*, JI-HONG LI*, SEOK-WON HONG* AND JIHONG-LEE**

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**Chungnam National University, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Underwater Vehicle 자율무인잠수정, Multivariable LQ Control 다변수 LQ 제어, Four Stern Thrusters 네 개의 주 추진기, Tank-test 수조시험

ABSTRACT: This paper describes depth, heading and speed control of an underwater vehicle that has four stern thrusters of which forces are coupled in the diving and, steering motion, as well as the speed of the vehicle. The optimal linear quadratic controller is designed based on a linearized- state space model, developed by combining the dynamic equations of speed, steering and diving motion. The designed controller gives provides an optimal thrust distribution, minimizing the given performance index to control speed, depth and heading simultaneously. To validate the performance of the controller, a simulation and tank-test are carried out with DUSAUV (Dual Use Semi-Autonomous Underwater Vehicle), developed by KORDI as a test-bed for testing new underwater technologies. Optimal gains of the controller are tuned, using a computer simulation environment with a nonlinear 6-DOF numerical DUSAUV model, developed by PMM (Planner Motion Mechanism) test. To verify the performance of the presented controller in experiment, a tank-test with DUSAUV is carried out in the ocean engineering basin in KORDI. The experimental results are also compared with the simulation results to investigate the accordance of the numerical and the real mode

1. 서 론

비교적 넓은 지역을 항행하면서 임무를 수행하는 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)는 수평타나 수직타와 같이 수직으로 배치된 제어판을 이용하여 수직면과 수평면 상의 운동을 각각 제어하도록 되어 있으나 저속에서의 조종성능을 확보하기 어렵다(이관목 등, 1998, 2003). 반면, ROV (Remotely Operated Vehicle)는 직각으로 배치된 추진기를 이용하여 전후 좌우 및 선회의 3축 운동을 제어 하지만 원거리 또는 고속항행에는 적합하지 않다(Fossen, 1994). 한편, 기뢰제거잠수정(MDV; Mine Disposal Vehicle)과 같은 수중이동체는 목표물 주위까지의 이동을 위한 항행성능 뿐만 아니라 목표물 주위에서의 위치 유지를 위한 저속에서의 조종성능이 확보되어야 한다. 이러한 경우, 수직타나 수평타와 같은 제어판으로는 저속에서 큰 조종력을 얻을 수 없으므로 잠수정의 조종장치로 여러 개의 추진기를 이용하는 경우가 많다. Fig. 1과 같이 선미에 장착된 네 개의

종추진기를 갖는 잠수정에 있어서, 각각의 추진기로부터 발생하는 추력은 잠수정의 수직, 수평운동 및 전진속도와 연계되어 있으므로, 잠수정의 수직제어판과 수평제어판이 수평 및 수직면 운동과의 상호 연계가 거의 없다는 가정 하에서 적용되는 기존의 제어방법(이관목 등, 1998, 2003)으로는 제어성능을 보장할 수 없다. 본 논문에서는 잠수정의 속도뿐만 아니라 종동요(pitch), 선수동요(yaw) 운동과 연계되어 있는 네 개의 선미 추진기의 추력을 효율적으로 분배하기 위해 다변수 제어기 설계법으로 잠수정의 운동제어기를 설계하였다. 잠수정의 운동방정식

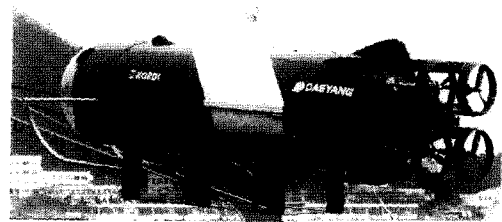


Fig. 1 An underwater vehicle with four stern thrusters

제1저자 전봉환 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171번지
042-868-7531 bhjeon@kriso.re.kr

으로부터 네 대의 추진기의 추력을 입력으로 하고 잠수정의 속

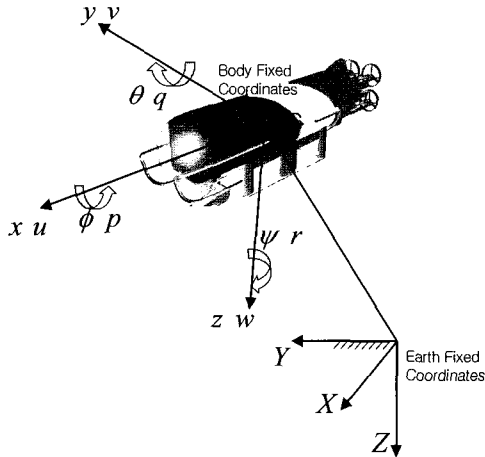


Fig. 2 Coordinate system of underwater vehicle

도, 심도 및 선수각을 출력으로 하는 선형화된 상태 방정식을 얻고, LQ (Linear Quadratic) 제어기 설계법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 한국해양연구원에서 민군겸용기술 개발을 위해 반자율 무인잠수정의 테스트베드로 제작된 DUSAUV (Dual Use Semi-Autonomous Underwater Vehicle) (Hong et al., 2002) 모델을 이용하여 수치 시뮬레이션과 수조실험을 각각 수행하였다. 시뮬레이션에서는 PMM(Planner Motion Mechanism) 시험을 통해 개발된 DUSAUV의 6자유도 비선형 운동방정식을 이용하였고 수조시험에 적합한 제어기의 계인을 구하였다. 수조시험은 한국해양연구원 해양공학 수조에서 이루어졌으며 잠수정의 심도, 선수각 및 속도를 동시에 제어한 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 제시하였다.

2. 잠수정 모델

제어판을 가지는 잠수체의 6자유도 비선형 운동방정식은 Gertler and Hagen(1967), Feldman(1979)에 의해 정리되었다. 본 절에서는 제어판 대신 네 대의 추진기로 항행하는 잠수정의 6자유도 비선형 운동방정식을 제시한다. Fig. 2에 나타난 좌표계에 따라 조류의 영향을 무시하고 제어판 대신 네 대의 추진기를 갖는 잠수정의 6자유도 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$M\dot{v} = F_{CC} + F_{DL} + F_{rest} + F_{thrust} \quad (1)$$

여기서, $\dot{v} = \{\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}\}^T$ 는 동체좌표계에서 표현되는 잠수정의 가속도벡터이고, M 은 부가질량을 포함하는 관성행렬, F_{CC} 는 수중체에 작용하는 전향력 및 원심력 항, F_{DL} 은 유체저항 및 양력, F_{rest} 는 복원력, 그리고 F_{thrust} 는 네 대의 추진기에 의한 추력 항이다. 식 (1)의 각 항을 구성하는 식들은 부록 A에 나타난 것과 같으며, 부록 A의 식들을 구성하는 계수들은 실험을 통하여 구하였고 이들은 부록 B에 나타내었다.

동체좌표계에서 표현된 식 (1)의 운동방정식은 식 (2)와 같이 속도변환행렬 J_1 에 의해 지구고정 좌표계로 좌표변환된다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) v_1 \Leftrightarrow v_1 = J_1^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_1 \quad (2)$$

여기서, $v_1 = [u, v, w]^T$ 는 Fig. 2와 같이 동체좌표계에서의 병진 속도벡터이고, $\eta_1 = [X, Y, Z]^T$ 와 $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 는 각각 지구고정 좌표계에서의 위치와 자세벡터이며 $\dot{\eta}_1$ 은 잠수정 위치의 시간 미분이다. 동체좌표계에서의 각속도는 식 (3)에 의해 지구고정 좌표계로 변환된다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) v_2 \Leftrightarrow v_2 = J_2^{-1}(\eta_2) \dot{\eta}_2 \quad (3)$$

여기서, $v_2 = [p, q, r]^T$ 는 동체좌표계에서의 각속도벡터, J_2 는 각속도 변환행렬로 부록 A에 나타난 것과 같이 구성된다.

3. 제어기설계

본 절에서는 2절에서 제시된 네 대의 추진기를 가지는 잠수정의 6자유도 운동방정식을 이용하여 속도, 선수동요 및 종동요 운동에 대한 선형화된 운동방정식을 유도하고 잠수정의 운동 제어를 설계한다.

식 (1)~(3)으로 표현되는 6자유도 비선형 운동방정식과 좌표 변환식에서, 교차유동(cross flow)항을 무시하고 추력모델의 2차 이상인 교차항을 무시하여 속도, 선수동요, 종동요에 관한 식들을 발췌하여 다시 정리하면 다음 식들과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(m - \frac{1}{2} \rho l^3 X_{\ddot{u}}\right) \dot{u} = \frac{1}{2} \rho l^2 b_x (u_{T1} + u_{T2} + u_{T3} + u_{T4}) \quad (4)$$

$$\left(I_y - \frac{1}{2} \rho l^3 M_{\dot{q}}\right) \dot{q} = \frac{1}{2} \rho l^4 u M_q q - \frac{1}{2} \rho l^3 b_m (u_{T1} + u_{T2} - u_{T3} - u_{T4}) \quad (5)$$

$$\left(I_z - \frac{1}{2} \rho l^3 N_{\dot{r}}\right) \dot{r} = \frac{1}{2} \rho l^4 u N_r r + \frac{1}{2} \rho l^3 b_N (u_{T1} - u_{T2} + u_{T3} - u_{T4}) \quad (6)$$

$$\dot{Z} = -u \sin \theta \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (8)$$

$$\dot{\phi} = r \quad (9)$$

여기서, u 는 잠수정의 전진속도이고, u_{Ti} ($i=1, 2, 3, 4$)는 제어 입력으로 각 추진기의 추력을 나타내며 잠수정의 전진비에 의해 다음과 같이 정의 한다.

$$u_{Ti} = \frac{u_0 n_i}{n_0 u} - 1, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

여기서, u_0 와 n_0 는 각각 잠수정의 설계속도와 이때의 프로펠러 회전수이고, i 는 추진기의 순번을 나타내며 선미쪽에서 볼 때 좌상, 우상, 좌하, 우하의 순으로 1, 2, 3, 4번으로 설정하였다. 부록 A와 식 (4)~(9)에서 사용된 그 외의 기호들은 Gertler and Hagen(1967)의 정의에 따랐다. 상태변수를 $x = [u \ q \ r \ Z \ \theta \ \phi]^T$ 로 하고, $\theta=0$, $u=u_0$ 인 평형점 근방에서 선형화하여 식 (4)~(9)를 행렬로 다시 정리하면 다음식과 같은 시스템 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + B u \\ y &= C x \end{aligned} \quad (11)$$

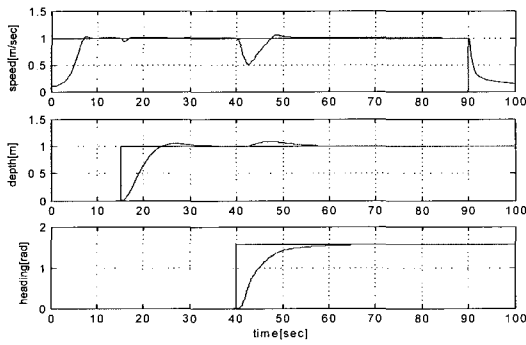


Fig. 4 Simulation results - control outputs

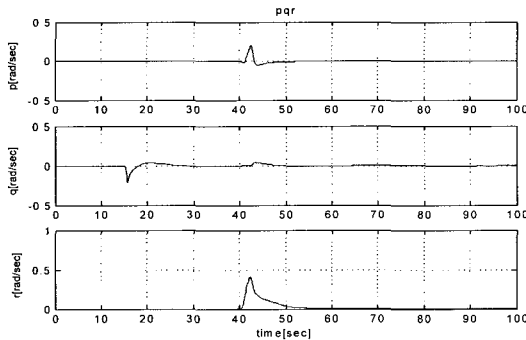


Fig. 5 Simulation results - angular velocities

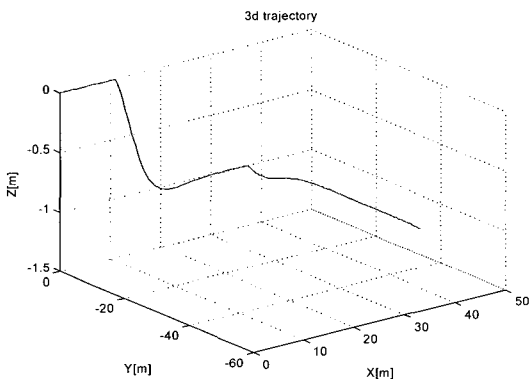


Fig. 6 Simulation results - 3-D trajectory

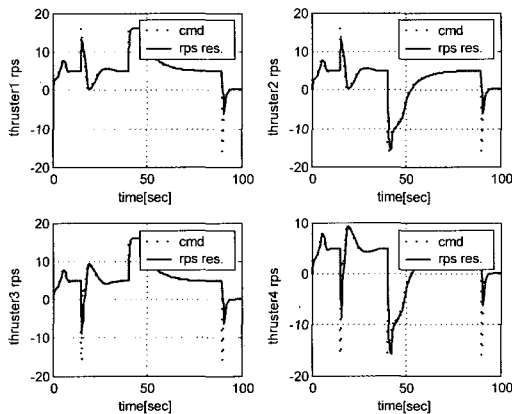


Fig. 7 Simulation results - control inputs

수 M_{vv} (부록 B)에 의해 음의 종동요 모멘트를 발생시키기 때문이다.

Table 1 Initial condition of tank-test

Z(m)	ϕ [degree]	θ [degree]	ψ [degree]	p[rad/sec]
-0.3674	8.40	5.0	75.40	-0.0071
q[rad/sec]	r[rad/sec]	u[m/s]	v[m/s]	w[m/s]
-0.0049	0.001	0.0550	-0.0060	-0.0150

5. 수조실험 결과 및 고찰

수조시험은 한국해양연구원 해양공학 수조에서 수행하였다. 해양공학 수조의 수심은 약 3.5 m였고, 폭 30 m, 길이 50 m의 공간에서 대각선 방향으로 향하도록 잠수정을 제어하였다. 제어 시험은 잠수정이 약 0.1m/s의 초기 전진 속도를 가진 상태에서 미리 프로그램된 시나리오에 따라 변경되는 속도, 심도, 방위각의 명령값을 추종하도록 진행하였으며 이때의 모든 상태와 제어 입력·출력 데이터는 계측되어 통신케이블을 통해 원격제어 컴퓨터로 전송되었다. 계측센서로는 IMU (Inertial Measurement Unit; HG1700), DVL (Doppler Velocity Log; RDI WN300), 심도계 (PS 1000) 및 자기컴퍼스 (TCM II)를 이용하였고 제어샘플 주기는 0.1초였다. Table 1은 잠수정에 내장된 센서들로부터 계측된 출발 시점의 초기조건이며 Fig. 8은 자동제어 시험중인 DUSAUV의 초기 출발 모습이다.

Fig. 9~12는 앞 장에서 시뮬레이션을 통해서 얻어진 식 (18), (19)의 제어계인을 이용하여 수조에서 시험을 행한 결과와 Table 1의 초기조건으로 시뮬레이션을 행한 결과를 동시에 나타낸 것이다. 초기 목표값이 속도 1m/s, 심도 0.5m, 그리고 방위각 60도로 주어졌을 때, Fig. 9에서 속도, 심도, 방위각이 모두 명령값을 잘 추종하며 이는 시뮬레이션 결과와도 잘 일치함을 확인할 수 있다. 전진속도의 초기 명령 추종응답이 시뮬레이션 결과에 비해 지연되는 것은 초기 출발시 잠수를 위해 발생하는 종동요 모멘트에 의해 Fig. 8과 같이 프로펠러가 공기중으로 노출되면서 추진력의 손실이 발생하기 때문인 것으로 추정된다. 20초 시점부터 25초까지는 방위각 명령의 변화를 추종하기 위해



Fig. 8 Intial start in tank-test

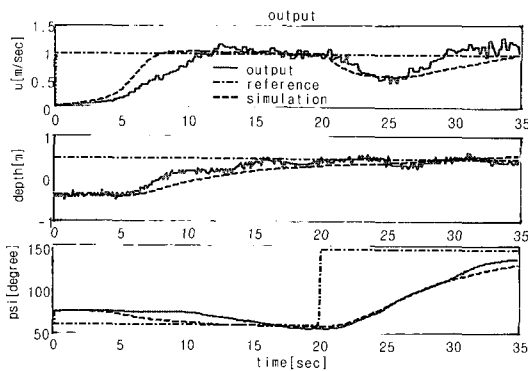


Fig. 9 Tank-test results - control outputs

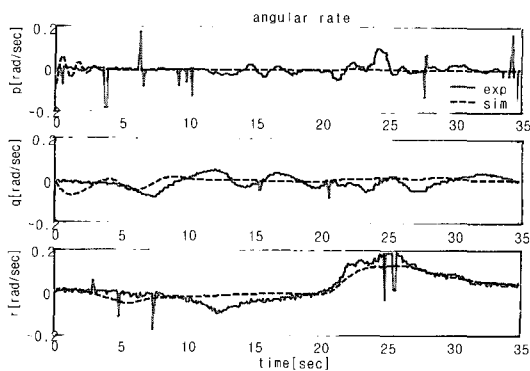


Fig. 10 Tank-test results - angular velocity

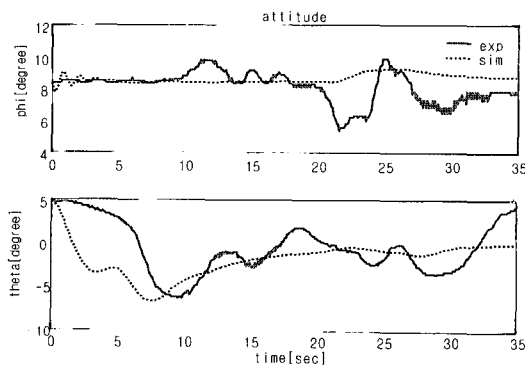


Fig. 11 Tank-test results - attitude

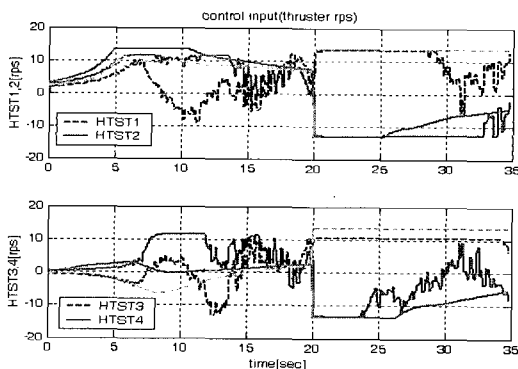


Fig. 12 Tank-test results - control inputs

시뮬레이션 및 실험결과 모두에서 4대의 추진기 회전수가 포화 상태가 되고 있으며 (Fig. 12) 이에 따라 전진속도가 약 0.5 m/s 까지 떨어진다. 이후 방위각 오차가 줄어들어 따라 추진모터 회전수의 포화가 해소되면서 전진속도도 목표값을 재추종해 간다. 이는 앞 장의 시뮬레이션에서 예측했던 결과와 정확하게 일치한다. Fig. 11의 횡동요각 (roll angle)이 8.4도의 편향(bias)을 가지는 것은 DUSAUV 모델의 무게중심점이 잠수정의 부력중심보다 우측에 있음을 나타낸다. Fig. 10과 12에서 관측되는 시뮬레이션과 실험 응답의 오차는 잠수정의 모델링 오차와 실험과정에서 발생하는 고려되지 않은 요인에 의해 나타나는 것으로 추측되며 그 범위는 크지 않다. Fig. 10의 선수동요 각속도 실험결과 응답에서 간헐적으로 나타나는 이상신호는 필터링되지 않은 센서의 계측 노이즈에 의한 것이다.

이상의 실험결과로부터 네 대의 추진기를 이용한 잠수정의 제어에 있어서 본 연구에서 설계된 제어가 속도, 심도, 방위각을 동시에 제어하기에 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 시뮬레이션 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있음에 따라 개발된 DUSAUV의 수치모델이 실제와 정성적으로 일치하고 있음도 아울러 확인할 수 있었다.

6. 결 론

제어판 없이 네 대의 추진모터만을 이용하여 항행제어를 수행하도록 설계된 수중이동체 DUSAUV의 속도, 심도 및 방위각의 동시 제어를 위한 다변수 LQ 제어기를 설계하였다. PMM 시험에 의해 개발된 테스트베드 잠수정 DUSAUV의 수치모델을 이용하여 설계된 제어기의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 과정에서 LQ 제어기의 하중행렬을 수조시험에 적합하도록 반복 시뮬레이션을 통해 조정하여 제어기의 계인을 구하였다. 얻어진 제어계인을 이용하여 수조에서 DUSAUV의 운동제어 실험을 수행하여 제어기의 성능을 검증함으로써 본 연구에서 설계된 제어기는 네 대의 모든 추진기가 잠수정의 운동과 연관되어 있는 수중이동체의 제어에 효과적임을 보였다. 또한, 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 DUSAUV의 수치 모델에 의한 시뮬레이션 결과가 수조실험 결과에 가깝다는 것을 확인함으로써 DUSAUV의 수치모델이 잠수정의 다양한 시뮬레이션에 효과적으로 활용될 수 있을 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 민군겸용기술개발사업인 “무인잠수정의 운항제어 및 통신시스템 개발”과 해양수산부의 “차세대 심해용 무인잠수정 개발(III)” 사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

이판묵, 전봉환, 홍석원 (1998). “장주기 샘플링을 갖는 자율무인

잠수정의 의사 슬라이딩모드 제어”, 한국해양공학회지, 제11권, 제4호, pp 169-179.

이판목, 전봉환, 이종무 (2003). “자율무인잠수정의 수중 도킹을 위한 비주얼 서보 알고리즘”, 한국해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 1-7.

전봉환, 이판목, 임용곤, 홍석원 (1999). “무인잠수정의 통합시물레이션 환경 구축을 위한 기초연구”, 한국해양공학회 추계 학술대회 논문집, pp 125-130.

Feldman, J. (1979). DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion, DTNSRDC/SPD-0393-09.

Fossen, Thor I. (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd.

Gertler, M. and Hagen, G.R. (1967). Standard Equations of Motion for Submarine Simulations, NSRDC Report No 2510.

Hong, S.W., Lee, P.M., Lim, Y.K., Lee, C.M., Jeon, B.H., Park, J.W., Choi, Y.C., Kim S.M. and Suh S.J. (2002). “Design and Implementation of a Dual Use Purpose Semi-Autonomous Underwater Vehicle”, Proc. of Underwater Defence Technology, Korea.

Jeon, B.H., Lee, P.M., Li, J.H., Hong, S.W., Kim Y.G. and Lee, J. (2003). “Multivariable Optimal Control of an Autonomous Underwater Vehicle for Steering and Diving Control in Variable Speed, Proc. of Oceans MTS/IEEE Conf., pp 2659-2664.

부록 A 동역학 방정식

- 관성행렬

$$M = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_v & 0 \\ 0 & 0 & m - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Z_w \\ 0 & -mz_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_v & my_G \\ mz_G & 0 & -mx_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} M_{iw} \\ -my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_r & 0 \\ \\ 0 & mz_G & -my_G \\ -mz_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_p & 0 & mx_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_r \\ my_G & -mx_G - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Z_q & 0 \\ I_x - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_p & -I_{xy} & -I_{xz} + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_r \\ -I_{xy} & I_y - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} M_q & -I_{yz} \\ -I_{xz} - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_r & I_{yz} & I_z - \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} N_r \end{bmatrix}$$

- 전향력 및 원심력

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

$$X_{CC} = mvr - mqw - my_G p q - mz_G pr + mx_G q^2 + mx_G r^2$$

$$Y_{CC} = -mur + mwp - mx_G q p - mz_G qr + my_G p^2 + my_G r^2$$

$$Z_{CC} = muq - mvp + mx_G r p - my_G r q + mz_G p^2 + mz_G q^2$$

$$K_{CC} = my_G u q + mz_G ur - my_G v p - mz_G w p - (I_z - I_y) q r + I_{yz} q^2 - I_{xz} r^2 + I_{xz} p q - I_{xy} p r$$

$$M_{CC} = mz_G v r + mx_G v p - mx_G u q - mz_G w q - (I_x - I_z) r p - I_{xz} p^2 - I_{yz} p q + I_{xy} q r + I_{xz} r^2$$

$$N_{CC} = -mx_G u r - my_G v r + my_G w q + mx_G w p - (I_y - I_x) p q + I_{xy} p^2 - I_{xy} q^2 + I_{yz} r p - I_{xz} r q$$

- 유체저항 및 양력

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

$$X_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2) + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (X_{qq} q^2 + X_{rr} r^2)$$

$$Y_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (Y_{vv} v + Y_{v|v|} v|v|) + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_{rr} r + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Y_{r|r|} r|r|$$

$$Z_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (Z_{vv} v^2 + Z_{ww} w + Z_{v|v|} v|v|) + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Z_{qq} q + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} Z_{q|q|} q|q|$$

$$K_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_{vv} v + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_{rr} r + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} K_{r|r|} r|r|$$

$$M_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (M_{vv} v^2 + M_{ww} w + M_{v|v|} v|v|) + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} M_{qq} q + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} M_{q|q|} q|q|$$

$$N_{DL} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} (N_{vv} v + N_{v|v|} v|v|) + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} N_{rr} r + \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} N_{r|r|} r|r|$$

- 복원력

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

- 추진력

$$F_{thrust} = [X_{thrust} \ Y_{thrust} \ Z_{thrust} \ K_{thrust} \ M_{thrust} \ N_{thrust}]^T$$

$$X_{thrust} = X_{T1} + X_{T2} + X_{T3} + X_{T4}$$

$$Y_{thrust} = Z_{thrust} = K_{thrust} = 0$$

$$M_{thrust} = -M_{T1} - M_{T2} + M_{T3} + M_{T4}$$

$$N_{thrust} = N_{T1} - N_{T2} + N_{T3} - N_{T4}$$

$$X_{Ti} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} \{a_X + b_X(\eta_i - 1) + c_X(\eta_i - 1)^2 + d_X(\eta_i - 1)^3\}$$

$$M_{Ti} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} \{a_M + b_M(\eta_i - 1) + c_M(\eta_i - 1)^2 + d_M(\eta_i - 1)^3\}$$

$$N_{Ti} = \frac{\rho}{2} \dot{I}^{\beta} \{a_N + b_N(\eta_i - 1) + c_N(\eta_i - 1)^2 + d_N(\eta_i - 1)^3\}$$

$$\eta_i = \frac{n_i u_0}{n_0 u} \text{ 여기서, } i = 1, 2, 3, 4,$$

n_0, u_0 는 각각 프로펠러 설계 속도 및 전진속도

- 좌표변환행렬

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

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

s, c, t 는 각각 \sin, \cos, \tan

부록 B DUSAUV 모델

- DUSAUV의 동역학 파라미터

$$m = 652.8$$

$$I_x = 29.16, \quad I_y = I_z = 360.05, \quad I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$$

$$(x_G, y_G, z_G) = (0, 0, 0), \quad (x_B, y_B, z_B) = (0, 0, -0.02)$$

$$u_0 = 2, \quad n_0 = 5.2$$

- 유체역학계수 (Nondimensionalized)

$$X_u = -0.0024,$$

$$X_{uv} = -0.00285640, \quad X_{uvw} = -0.00454427$$

$$X_{qq} = 0.04466548, \quad X_{rr} = 0.04837608$$

$$Y_v = -0.05257961, \quad Y_w = -0.14264210, \quad Y_{uid} = 0.03185948$$

$$Y_r = 0.00750169, \quad Y_p = 0.04083242, \quad Y_{\dot{r}\dot{r}} = 0.035929$$

$$Z_{vv} = -0.03450369$$

$$Z_{\dot{w}} = -0.05582685, \quad Z_{\dot{w}} = -0.08999440, \quad Z_{uid} = -0.08490253$$

$$Z_q = -0.00477980, \quad Z_q = -0.02568048, \quad Z_{\dot{d}\dot{d}} = -0.072053$$

$$K_v = 0.00154146, \quad K_v = -0.00328219$$

$$K_p = -0.01$$

$$K_r = 0.00037772, \quad K_r = 0.00045582, \quad K_{\dot{r}\dot{r}} = 0.00234668$$

$$M_{vv} = 0.01153473$$

$$M_{\dot{w}} = -0.00632000, \quad M_{\dot{w}} = 0.00880454, \quad M_{uid} = 0.00346087$$

$$M_q = -0.00308712, \quad M_q = -0.01597730, \quad M_{\dot{d}\dot{d}} = -0.050803$$

$$N_v = 0.00523318, \quad N_v = -0.01129999, \quad N_{uid} = 0.06226890$$

$$N_r = -0.00351482, \quad N_r = -0.02304781, \quad N_{\dot{r}\dot{r}} = -0.034163$$

- 추력계수

$$a_X = 0, \quad b_X = 0.1802, \quad c_X = 0.0012, \quad d_X = 0.0002405$$

$$a_M = 0, \quad b_M = 0.00035, \quad c_M = 0.00027, \quad d_M = 0.000103$$

$$a_N = 0, \quad b_N = 0.000236, \quad c_N = 0.000306, \quad d_N = 0.000084$$

2004년 4월 27일 원고 접수

2005년 4월 4일 최종 수정본 채택