

AUV-SNUUV I의 동유체력 계수 추정

김기훈*·김준영**·신민섭***·최항순****·성우제*****

Estimation of Hydrodynamic Coefficients for AUV-SNUUV I

Kihun Kim*, Joonyoung Kim**, Minseop Shin***, Hang S. Choi**** and Woojae Seong*****

Key Words : Autonomous Underwater Vehicle, Extended Kalman Filter, Hydrodynamic Coefficient Estimation

Abstract

This paper describes the hydrodynamic characteristics of a test-bed AUV SNUUV-I constructed at Seoul National University. The main purpose of the AUV is to carry out fundamental control and hydrodynamic experiments. Its configuration is basically a long cylinder of 1.35m in length and 0.25m in diameter with delta-type wings near its rear end. On the edge of each wing, a thruster of 1/4HP is mounted, which is used for both drive and turn the vehicle for horizontal movement as the output control power is varied. A pair of control surfaces installed near its front part generates pitch moments for vertical movement.

The 6 DOF mathematical model of SNUUV-I contains hydrodynamic forces and moments expressed in terms of a set of hydrodynamic coefficients. These coefficients can be classified into linear damping coefficients, linear inertial coefficients and nonlinear damping coefficients. It is important to estimate the exact value of these coefficients to control the vehicle precisely. Among these, the linear coefficients are known to affect the motion of the vehicle dominantly.

The linear damping coefficients are estimated by using Extended Kalman Filter. The responses of the vehicle to input signals are used to estimate the hydrodynamic coefficients, which can be inferred from output signals measured from an IMU (inertial motion unit) sensor, while the linear inertial coefficients are calculated by a potential code.

By using these coefficients estimated as described above, a simulation program is constructed using Matlab.

1. 서론

최근 해양산업의 발전과 더불어 무인 자율주행 잠수정 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)의 필요성이 제기되어 관련 기술에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있다[1]. AUV는 운전자에 의하여 조종되는 것이 아니고 원하는 자세와 위치가 되도록 명령을 하면 주위환경의 변화를 감지하여 스스로 주행경로를 판단하는 무인 자율주행 잠수정이므로 고도의 제어시스템이 필요하다. 제어시스템의 개발에는 여러 번의 설계와 실험을 반복해야 하므로 적지 않은 인력과 시간이 소모된다. 따라서 AUV를 보다 효율적으로 설계하기 해서는 우선 수학적 모델을 이용하여 조종과 제어성능을 해석하는 과정이 필요하다.

대다수 AUV의 수학적 모델은 6자유도의 운동방정식으로 표현되며, 많은 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링되어 있다. 이에 관련된 많은 연구가 진행되어 왔는데, Gertler와 Hagen [2]은 잠수정의 운동 해석에 표준이 되는 운동방정식을 정립하였고, Feldman [3]은 실제와 더욱 근사하도록 수정된 운동방정식을 제시하였다. Fossen [4]은 잠수정의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식을 전개하였고, Healey와 Lienard [5]는 6

자유도의 비선형 운동방정식과 유체동역학 계수를 제시하였다. 본 연구에서는 AUV-SNUUV I의 운동을 해석할 수 있도록 6자유도의 비선형 운동방정식을 유도하고, 이 운동을 모사할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 다양한 입력과 환경 하에서 AUV의 운동성능을 해석하였다. SNUUV I의 주요제원과 치수는 표1 및 표2와 같다.

2. 운동방정식

그림 1은 완성된 SNUUV I의 모습이다. 좌표계는 그림 2와 같이 지구고정 좌표계와 선체고정 좌표계를 사용한다. 좌표계의 원점을 잠수정의 부력중심에 위치시켰으며, 운동방정식은 상하 좌우 대칭을 가정하여 다음의 식(1)-(6)과 같이 간략한 형태로 표현하였다.

$$m[\ddot{u} - vr + wq + z_G(pr + \dot{q})] = X_{\dot{u}}\dot{u} - (W - B)\sin\theta - \frac{\rho}{2}A_r C_d u^2 + X_{prop} \quad (1)$$

$$m[\dot{v} + ur - wp + z_G(qr - \dot{p})] = Y_r\dot{r} + Y_v\dot{v} + Y_p\dot{p} + Y_r r + Y_v v + (W - B)\cos\theta\sin\phi \quad (2)$$

$$m[\dot{w} - uq + vq - z_G(p^2 + q^2)] = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_q q + Z_w w + Z_{\delta_s} \delta_s + (W - B)\cos\theta\cos\phi \quad (3)$$

* 서울대학교 대학원, shaton2@snu.ac.kr

** 서울대학교 조선해양공학과, jkimor@hanmail.net

*** 서울대학교 대학원, led2992@chollian.net

**** 서울대학교 조선해양공학과, hschoi@plaza.snu.ac.kr

***** 서울대학교 조선해양공학과, wseong@snu.ac.kr

$$\begin{aligned} & I_x \dot{p} + (I_x - I_y)qr - mz_G(\dot{v} + ur - wp)] \\ & = K_p \dot{p} + K_v \dot{v} + K_\rho p + K_r r + K_v v \\ & \quad - (z_G W - z_B B) \cos \theta \cos \phi + K_{prop} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr + mz_G(\dot{u} - vr + wq)] \\ & = M_q \dot{q} + M_q q + M_u w + M_{\delta_s} \delta_s \\ & \quad - (z_G W - z_B B) \sin \theta + M_{prop} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq \\ & = N_r \dot{r} + N_v \dot{v} + N_\rho p + N_r r + N_v v + N_{prop} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 무인잠수정의 자세와 위치는 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} &= (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= u \cos \psi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) \\ & \quad + w (\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi) \\ \dot{Y} &= u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) \\ & \quad + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\ \dot{Z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (8)$$

3. 유체동역학 계수추정

6자유도 운동방정식으로 표현되는 AUV의 수학적 모델은 많은 수의 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링되어 있다. 그러므로 성능해석을 위한 시뮬레이션에서는 이러한 유체동역학 계수를 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다. 유체동역학 계수는 크게 보아 선형 감쇠계수, 선형 관성력계수 및 비선형 감쇠계수 등의 3가지로 구분할 수 있는데, 선형 감쇠계수는 무인잠수정의 조종성능에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 한편 비선형 감쇠계수는 선형 운동시 조종성능에 미치는 영향이 작기 때문에 본 연구에서는 일단 배제하였다.

3.1 비선형칼만필터의 적용

본 연구에서는 선형 감쇠계수를 추정하기 위해서 비선형 칼만 필터(EKF)를 사용하였으며, 추정 방식은 그림 3과 같다.

EKF는 비선형 모델에 플랜트 섭동이나 센서 잡음이 포함된 확률적 시스템에서 상태 변수를 최적으로 추정하는 방법이며, 미지의 입력 변수나 파라미터 등을 추정하고자 할 때는 이를 상태 변수로 변환하여 추정하는 방법이다[6]. EKF를 전개하기 위하여 다음과 같은 비선형 확률적 시스템을 생각한다.

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}, k-1) + w_{k-1} \\ y_k &= h(x_k, k) + v_k \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $x_k \in R^n$ 이고, $y_k \in R^p$ 이다. 입력 변수 u 는 비선형 함수 f 에 포함되어 있는데, 자세한 표기를 생략한다. 또한 $w_k \sim N(0, Q_k)$ 와 $v_k \sim N(0, R_k)$ 는 각각 플랜트 섭동과 센서 잡음을 나타내며, EKF는 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(+)&= \hat{x}_k(-) + K_k(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{x}_k(-)&= f(\hat{x}_{k-1}(+), k-1) \\ \hat{y}_k &= h(\hat{x}_k(-), k) \end{aligned} \quad (10)$$

오차 상호분산과 이득 값은 다음과 같이 Ricatti 방정식을 전개하는 과정에서 구해진다.

$$\begin{aligned} P_k(-) &= F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k &= P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \\ P_k(+) &= [I - K_k H_k] P_k(-) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_{k-1} &= \frac{\partial f(x, k-1)}{\partial x} \Big|_{x = \hat{x}_{k-1}(+)} \\ \text{여기서 } H_k &= \frac{\partial h(x, k-1)}{\partial x} \Big|_{x = \hat{x}_k(-)} \end{aligned} \quad (12)$$

식(10)부터 식(12)는 전형적인 EKF를 나타내며, 만약 플랜트의 비선형식 속에 미지의 파라미터가 포함되어 있어서 이를 추정하고자 할 때는 이 파라미터를 상태 변수로 대체함으로써 EKF를 설계할 수 있다. 파라미터가 포함된 시스템은 다음과 같다.

$$x_k = f(x_{k-1}, \beta_{k-1}, k-1) + w_{k-1} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} y_k &= h(x_k, \beta_k, k) + v_k \\ \text{위 식에서 파라미터 } \beta &\text{를 상태 변수로 대체하면 다음과 같이 변환되고,} \end{aligned}$$

$$x_k^* = \begin{bmatrix} x_k \\ \beta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_{k-1}, k-1) \\ \beta_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{k-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$y_k = h(x_k^*, k) + v_k$$

EKF는 결국 다음 식과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^*(+) &= \hat{x}_k^*(-) + K_k(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{x}_k^*(-) &= f(\hat{x}_{k-1}^*(+), k-1) \\ \hat{y}_k &= h(\hat{x}_k^*(-), k) \end{aligned} \quad (15)$$

오차 상호분산과 이득 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_k(-) &= F_{k-1}^* P_{k-1}(+) F_{k-1}^{*T} + Q_{k-1} \\ K_k &= P_k(-) H_k^{*T} [H_k^* P_k(-) H_k^{*T} + R_k]^{-1} \\ P_k(+) &= [I - K_k H_k^*] P_k(-) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} F_{k-1}^* &= \frac{\partial f(x^*, k-1)}{\partial x^*} \Big|_{x^* = \hat{x}_{k-1}^*(+)} \\ \text{여기서 } H_k^* &= \frac{\partial h(x^*, k-1)}{\partial x^*} \Big|_{x^* = \hat{x}_k^*(-)} \end{aligned} \quad (17)$$

위에서 전개된 EKF를 이용하여 유체동역학 계수를 추정하기 위해 SNUUV I의 6자유도 운동방정식을 적용하면 다음과 같이 간략히 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^* &= \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\hat{x}_{k-1}^*(+), k-1) \\ \hat{\beta}_{k-1} \end{bmatrix} + K_k(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{y}_k &= h(\hat{x}_k^*(-), k) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 상태 변수는 $u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, \beta$ 이며, β 는 추정하고자 하는 선형 감쇠계수를 나타낸다. 출력 변수는 $a_x, a_y, a_z, p, q, r, \phi, \theta, \psi$ 이며 a_x, a_y, a_z 는 가속도계에서 측정이 가능하고, p, q, r 은 자이로에서 측정할 수 있다. 또한 ϕ, θ, ψ 는 p, q, r 의 적분된 값을 사용한다.

EKF의 설계시 어려운 작업중의 하나는 오차 상호분산 P 의 초기치 결정과 잡음 상호분산인 Q 와 R 의 값을 결정하는 일이며, 이것에 따라 추정성능이 영향을 받는다. 본 연구에서는 EKF의 안정성을 보장하기 위하여 상태 변수의 오차를 토대로 정의된 Lyapunov 함수를 만족하도록 잡음 상호분산 R 을 다음과 같이 구한다[7].

$$R_k = \alpha_1 H_k P_k(-) H_k^T + \alpha_2 I \quad (19)$$

여기서 α_1 과 α_2 는 양수이며, 튜닝할 수 있는 상수이다. 또한 P 의 초기치와 Q 는 해당하는 상태 변수의 상대적인 크기를 감안하여 설정하였다.

3.2 선형감쇠계수의 추정

AUV의 성능해석에 중요한 영향을 미치는 선형 감쇠계수를 추정하기 위하여 EKF를 SNUUV I에 적용하였다. 선형 감쇠계수는 Pitch 운동에 관련된 M_q, M_{δ_s}, M_w , Yaw 운동에 관련된 N_r, N_v, N_p , Heave 운동에 관련된 $Z_{\dot{w}}, Z_q, Z_w$, Sway 운동에

관련된 Y_u, Y_v, Y_w , 그리고 Roll 운동에 관련된 K_p, K_r, K_ϕ 등 총 15개로 구성되어 있다. 위에서 계수는 민감도가 높은 순서대로 표기하였다. 계수추정을 위해 SNUUV I을 예인수조에서 운행하여 입력/출력 자료를 측정하였다. 다양한 운동상태를 측정하기 위해 상하좌우 지그재그 운동을 수행하였고, 이를 위해 초기 속도 0.5 m/s에서 승강타를 +20°에서 -20°로 20초 간격으로 바꾸었고, 좌우 추진기의 입력 전압도 20초 간격으로 +5 volt에서 0 volt로 변경하였다.

그림 4는 실제 측정된 가속도와 각속도 신호를 나타내고 있다. EKF에서 사용할 입력/출력 자료는 승강타의 각도, 좌우 추진기의 입력전압, 필터링 된 가속도, 필터링 된 각속도 그리고 각속도를 적분한 각도 등이며, 이를 이용하여 선형 감쇠계수를 추정하게 된다. 그림 5에서부터 그림 6은 무차원화 된 15가지 선형 감쇠계수의 추정결과를 보여주고 있다. 대체로 보아 추정 결과는 초기 과도상태를 보이다가 20초내지 40초가 지나면 일정한 값으로 안정되게 수렴함을 알 수 있다. 본 연구에서는 아직 SNUUV I에 대한 PMM 실험을 수행하지 않았기 때문에 이렇게 수렴하는 계수의 값이 참값인지를 판단할 수 없다. 일반적으로 횡운동에 관련된 N_u, Y_u, K_p 는 실험치와 차이를 보이는 것으로 알려져 있는 데, 이는 횡운동을 정확하게 계측하기가 어렵고, 또한 계측기에 이 방향 성분의 표류가 나타나는 것으로 알려져 있다.

EKF에서 추정된 선형 감쇠계수는 SNUUV I의 운동성능 해석이나 제어기 설계에 사용된다.

3.3 선형 관성력계수의 추정

본 연구에서는 선형 관성력계수를 구하기 위해 3차원 특이점 분포방식을 사용한 포텐셜 코드를 사용하였다. 그림 7은 수치계산을 위해 형성된 메쉬를 보여주고 있다. 여기서 계산된 선형 관성력계수는 선형 감쇠계수의 추정, 운동성능 해석 및 제어기 설계에 적용된다. 표3은 이렇게구한 SNUUV I의 무차원화된 선형관성력 계수이다.

3.4 시뮬레이션

SNUUV I의 운동성능을 해석하기 위하여 Matlab의 Simulink를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 그림 8은 SNUUV I의 시뮬레이션을 위한 Simulink 모델을 보여주고 있다. 시뮬레이션 조건은 초기속도 1.5 m/s에서 승강타를 20°, 좌측 추진기에 5 volt, 우측 추진기에 0 volt 입력전압을 준 경우에 대해 500초 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 SNUUV I이 우현으로 조향하면서 연직하방으로 잠항하는 경우이다. 그림 9는 AUV의 속도 u, v, w 와 자세 ϕ, θ, ψ 를 보여주고 있다. 그림 10은 이를 3차원 궤적으로 나타낸 것이다.

4. 요약 및 향후과제

본 연구에서는 EKF를 이용하여 조종성능에 큰 영향을 미치는 선형 감쇠계수를 추정할 수 있음을 보였다. 이는 PMM 실험을 대체하거나 실험 값을 검증하는 유용한 기법으로 사용될 것으로 기대된다. 이렇게 EKF로 추정된 계수를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

향후에는 SNUUV I에 대한 PMM 실험을 수행하여 EKF기법에 의한 결과와 비교·검증하고 추정된 계수를 적용하여 제어 실험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 일부로서 수행된 연구임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] R. L. Wrenli, "AUVs - A Technology Whose Time Has Come," Proc. Underwater Technology, 2002.
- [2] M. Gertler, G. R. Hagen, "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [3] J. Feldman, "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion," DTNSRDC/SPD-0393-09, 1979.
- [4] T.I. Fossen, "Underwater Robotic Vehicle Dynamics," Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994.
- [5] A.J. Healey, D. Lienard, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering* Vol. 18, No. 3, 1993.
- [6] M. S. Grewal, A. P. Andrews, Kalman Filtering, Chapter 5, Prentice Hall, 1993.
- [7] M. Boutayeb, H. Rafaralahy, M. Darouach, "Convergence Analysis of the Extended Kalman Filter Used as an Observer for Nonlinear Deterministic Discrete-Time Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, No. 4, pp. 581-586, 1997.

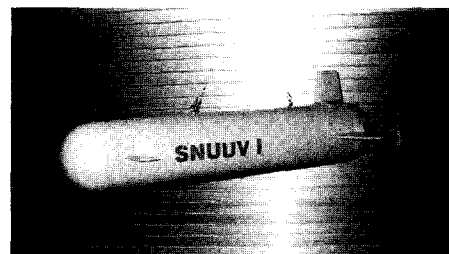


Fig 1. Overview of SNUUV I

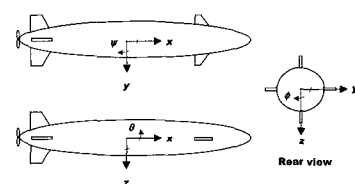


Fig 2. Coordinate system

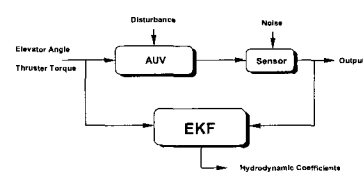


Fig 3. Flowchart of estimation method

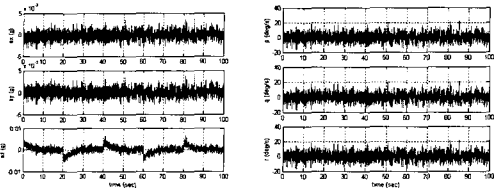


Fig 4. Measured signal of acceleration and velocity

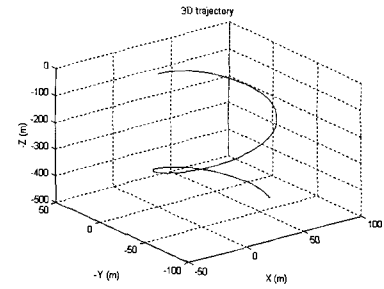


Fig 10. Simulation trajectory

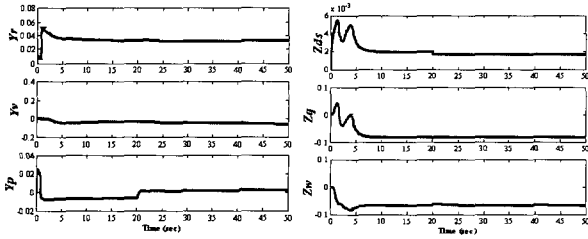


Fig 5. Sway and Heave Coefficients

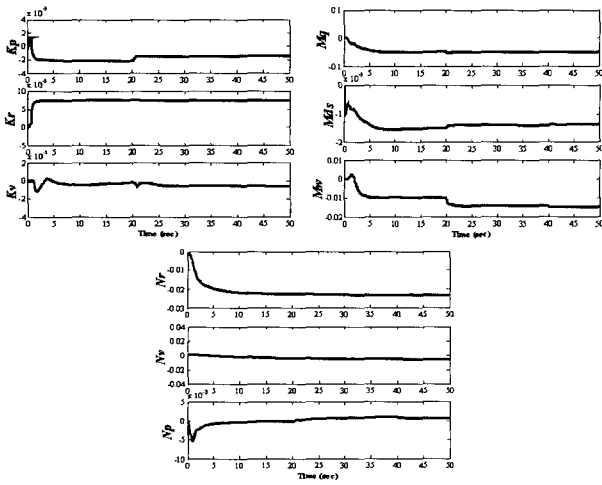


Fig 6. Roll, Pitch, Yaw coefficients

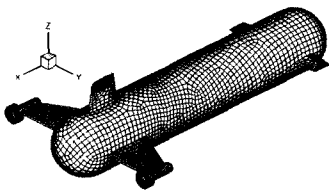


Fig 7. 3D Mesh for potential calculation

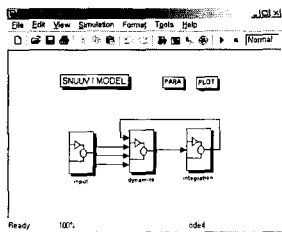


Fig 8. Simulation program

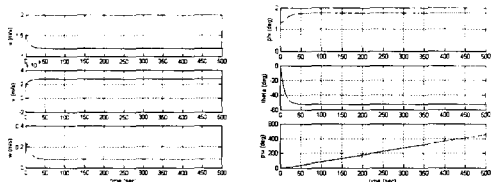


Fig 9. velocity(u , v , and w) and acceleration (ϕ , θ , and ψ)

Table 1 Specification of SNUUV I

Items	Specifications & Characteristics
Dimension	0.25m (D) × 1.35m (L)
Weight	Neutral buoyancy in water
Displacement	≈ 0.045(m ³)
Max. Depth	100 meters
Operation Time	1 hours
Speed	0.5 m/s (Design), 2m/s (Maximum)
Power	14.8V-7.2AH per Unit 100Watt Lithium Ion Battery×6 EA
Thrusters	Main Thruster(1/4 HP) 2 EA
Servo Motor	14 kgcm
Control Surface	NACA0012
Sensors	Underwater Camera (2 axis) Inertial Motion Unit, Sonar Pressure Sensor, Inclinator Magnetic Compass, Leakage Sensor

Table 2. Principal values of SNUUV I

Symbol	Value	Symbol	Value
W	428.6 [N]	x_G	0 [m]
B	428.6 [N]	y_G	0 [m]
m	43.7 [kg]	z_G	0.026 [m]
I_x	0.3319 [kgm ²]	x_B	0 [m]
I_y	1.4844 [kgm ²]	y_B	0 [m]
I_z	1.7596 [kgm ²]	z_B	0 [m]

Table 3. Linear inertial coefficient of SNUUV I

관성력계수	무차원 값
X_u	-0.00458125
Y_v	-0.04638562
Z_w	-0.05776860
K_p	-0.00032541
M_q	-0.00445124
N_r	-0.00292170