



Received: 2023/05/31
Revised: 2023/06/12
Accepted: 2023/06/28
Published: 2023/06/30

***Corresponding Author:**

Chul Hyun

Dept. of System Engineering, LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5178-4293
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: chul.hyun@gmail.com

Abstract

본 논문은 고속 주행하는 소형 수중 운동체의 해상시험 결과를 활용한 롤 축의 운동방정식 계수 수정 과정을 다룬다. 수중 모형 시험 결과를 근사하여 산출되는 수중 운동체 조종 운동 방정식의 유체력 미계수 오차를 해상 시험 결과와 비선형 운동 모델에 대한 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 보다 정확한 값을 추정해냈다. 제어법칙도 수정된 운동 방정식에 맞도록 수정함으로써, 진동현상이 발생했던 기존 해상 시험보다 안정적인 롤 제어 성능을 획득할 수 있었다.

This paper describes the process of modifying the coefficients of the equation of rolling motion using the results of sea trials of a high speed small underwater vehicle. The errors of the hydrodynamic coefficients in the underwater vehicle control motion equation, which are estimated using the results of VPMM tests, are compared with the results of the sea trials and simulation of a nonlinear model to estimate a more accurate value. By modifying the control law to match the modified dynamic equation, it was possible to obtain more stable roll control performance than the existing sea trial, which had vibration problems.

Keywords

자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle), 유체력계수(Hydrodynamic Coefficient), 롤 제어(Roll Control), 수중운동체 동역학(Dynamics of Underwater Vehicles)

해상시험 결과를 활용한 수중 운동체의 롤 댐핑 계수 튜닝

Tuning of Roll Damping Coefficient of Underwater Vehicle Using Sea Trial Results

현철^{1*}, 김현승², 이성균¹, 이호진¹

¹LIG넥스원 체계공학팀 수석연구원

²LIG넥스원 체계공학팀 선임연구원

Chul Hyun^{1*}, Hyun Seung Kim², Sungkyun Lee¹, Hojin Lee¹

¹Principal researcher, Dept. of System Engineering, LIG Nex1

²Senior researcher, Dept. of System Engineering, LIG Nex1

1. 서론

수중 운동체의 조종 성능은 선체의 기본 형상과 타의 특성에 의해 대부분 결정된다. 뉴턴 제2법칙으로부터 유도되는 6자유도 운동방정식의 동유체력 계수는 구속 모형 시험의 결과를 이용하여 얻을 수 있다[1]. 완성된 수중 운동체의 동역학 방정식을 이용하면 이에 맞는 제어를 설계하고 조종 특성을 가늠할 수 있게 된다[2-4].

10 knot 이상 고속으로 기동하는 수중 운동체에 대하여, 가로축과 세로축이 서로 비연성되어 있다는 가정 하에서, 선형화된 운동 모델을 이용하여 경로방향, 심도방향의 제어를 각각 설계하여 성공적으로 적용한 바 있다[4]. 이러한 비연성 가정이 성립되려면, 롤(roll) 자세가 0도에 가까운 값으로 제어되는 것이 필수적이다.

모형 시험을 통해 얻어지는 롤 댐핑 계수 값이나 제어타와 관련된 제어 계수 값은 일반적으로 실제 값과 차이가 큰 경우가 많다. 그러므로 안정적이고 견실한 제어 성능을 얻기 위해서는, 수중 시험 결과를 활용하여 유체력 미계수 값을 수정하고, 다시 이에 맞는 제어를 수정 설계하여야 한다.

2. 운동방정식

Fig. 1은 본 논문의 연구대상이 되는 고속 소형 수중 운동체의 형상이다. 상하좌우 대칭의 형상을 갖고 선미에 프로펠러와 조종타가 배

치되어 있는 형태이다. 6자유도 운동을 하는 수중운동체의 기동특성은 Fig. 2와 같이 지표고정 좌표계와 동체 고정 좌표계를 이용하여 표현할 수 있다[2,3].



Fig. 1. Figuration of underwater vehicle

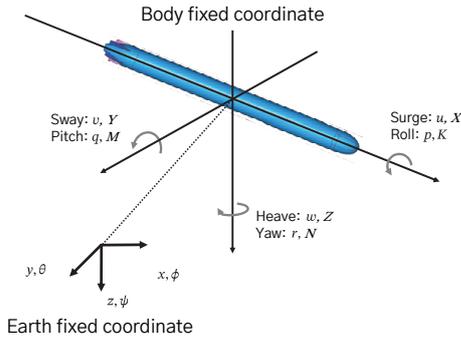


Fig. 2. Coordinate system of underwater vehicle

본 논문의 대상이 되는 수중 운동체의 운동방정식은 식 (1)과 같이 뉴턴 제2법칙으로부터 유도된 일반 6자유도 비선형 방정식을 기반으로, xz 평면을 기준으로 대칭인 형상과 평형상태에 대해서 선형화하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{U} + QW - RV) \\ Y &= m(\dot{V} + RU - PW) \\ Z &= m(\dot{W} + PV - QU) \\ L &= I_x \dot{P} + (I_z - I_y)QR - I_{xz}(\dot{R} + PQ) \\ M &= I_y \dot{Q} + (I_x - I_z)RP - I_{xz}(R^2 - P^2) \\ N &= I_z \dot{R} + (I_y - I_x)PR - I_{xz}(\dot{P} - QR) \end{aligned} \quad (1)$$

롤 안정화 제어에 의하여 롤각은 0으로 평형상태를 유지한다는 가정 하에, 형상과 질량분포가 수직면과 수평면에 대해 대칭인 운동체가 연직면에서 직선 운동하는 경우에 대해 운동방정식을 정리하면 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} + W_0 q) &= X_u u + X_{\dot{u}} \dot{u} - (W - B) \cos \Theta_0 \theta \\ m(\dot{v} - W_0 p + U_0 r) &= Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\ &\quad + (W - B) \sin \Theta_0 \psi \\ &\quad + (W - B) \cos \Theta_0 \phi \\ &\quad + Y_{\delta_r} \delta_r \\ m(\dot{w} - U_0 q) &= Z_w w + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_q q + Z_{\dot{q}} \dot{q} \\ &\quad - (W - B) \sin \Theta_0 \theta + Z_{\delta_e} \delta_e \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_x \dot{p} &= L_p p + L_{\dot{p}} \dot{p} + L_{\delta_a} \delta_a \\ I_y \dot{q} &= M_w w + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_q q + M_{\dot{q}} \dot{q} \\ &\quad - x_B B \sin \Theta_0 \theta + M_{\delta_e} \delta_e \\ I_z \dot{r} &= N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} \\ &\quad - x_B B \sin \Theta_0 \psi - x_B B \cos \Theta_0 \phi + N_{\delta_r} \delta_r \end{aligned} \quad (3)$$

비선형 운동방정식은 3축에 대한 병진과 회전운동이 결합되어 속도, 각속도 성분이 섞여 있기 때문에 운동 특성을 해석하고 제어를 설계하기 위해서는 선형 방정식이 필요하다. 상태변수는 평형상태 + 교란상태로 표현 가능하고, 평형상태에서 교란상태 변수가 작다는 가정 하에 선형방정식으로 정리할 수 있다.

롤 축에 대해서는 롤 각속도와 롤 각도를 $([p \ \phi]^T)$ 상태변수로 하여 평형 선형 방정식을 정리할 수 있고 이는 다음 식 (4)와 같다. 식 (4)의 L_p 계수가 수중 운동체의 롤 운동과 관련된 유체력 계수이다.

$$\begin{aligned} O_{roll} \dot{X}_{roll} &= P_{roll} X_{roll} + Q_{roll} u_{roll} \\ X_{roll} &= [p \ \phi]^T, \quad Q_{roll} = [L_{ail}], \quad u_{roll} = \delta_a \\ O_{roll} &= \begin{bmatrix} I_{xx} & -L_p 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{roll} = \begin{bmatrix} L_p & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

구속 모형 시험 중 수직면 운동시험을 통하여, 운동방정식을 구성하는 외력항 중에서 동유체력 및 제어판에 의한 제어력을 모델링하는데 필요한 동유체력 계수를 구할 수 있다[5,6]. 참고문헌[6]의 결과를 보면, 정적 강타 시험, 순수 상향동요 시험, 순수 중동요시험, 순수 좌우동요 시험 등의 결과는 곡선근사 결과와 잘 일치하고 있다. 이로부터 곡선근사식의 회귀계수로 얻어지는 동유체력 미계수가 신뢰성 있게 도출되고 있음을 확인할 수 있지만, 롤 축의 특성을 확인할 수 있는 순수 선수 동요시험의 결과는 다른 시험들과는 달리 근사 곡선과의 차이가 존재하여, 그만큼 결괏값이 부정확할 수 있음을 알 수 있다.

3. 롤 제어기 설계

롤 방향 운동에 대한 제어기는 다음 식 (5)와 같이 설정하였다. 자세측정장치(AHRS) 등의 센서에서 측정되는 롤 각도의 값과 롤 각속도 출력에 적절한 이득이 곱해져서 롤 제어타(aileron)를 구동시키는 형태이다[3].

보통 어뢰 형태의 대상 수중 운동체에서 롤 제어는 따로 존재하지는 않으며, 방향 타각(rudder)과 피치 및 심도 제어를 위한 승강 타각(elevator)를 조합해서 사용하게 된다[7].

$$\delta_a = -K_\phi \phi - K_p p \tag{5}$$

롤 축 제어 루프의 간략한 블록도를 Fig. 3에 도시하였다.

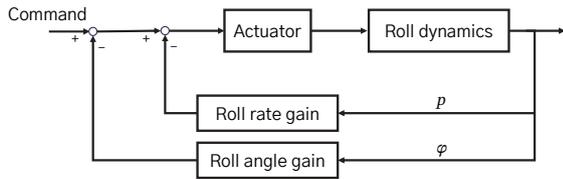


Fig. 3. Block diagram of roll control loop

식 (5)의 적절한 제어 이득값은 극점 배치 기법을 이용하여, 수중 운동체의 기동 안정성을 유지하는 동시에, 외력·비선형 오차·구동기 특성·센서 오차 등에 의한 성능 저하 요소를 극복하기 위하여 충분한 마진을 가질 수 있도록 설계되었다[4].

4. 1차 해상시험 결과

실제 수중에서 운동체를 고속으로 발사하고, 제어 시험을 수행한 결과의 롤 방향 각속도 출력값은 Fig. 4와 같다. 발사 후 프로펠러가 회전하기 시작할 때 강하게 발생하는 횡동요 모멘트가 작용하고 난 뒤, 롤 자세가

안정적으로 제어된다면 롤 방향의 자이로 출력값도 0에 수렴하는 형태가 나와야 한다.

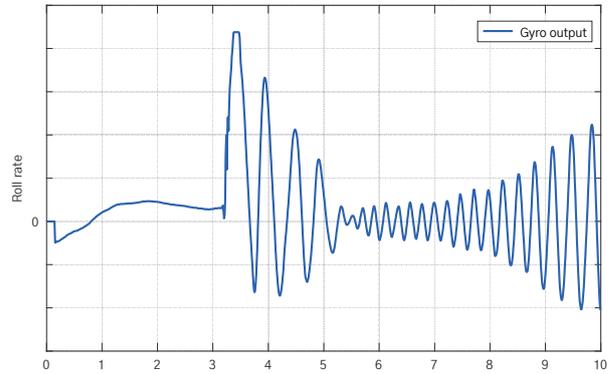


Fig. 4. Sea trial results

그러나 결과에서 확인 가능하듯이, 대략 3초 이후에 횡동요 모멘트 작용한 뒤에 각속도 값이 주기적으로 진동하며 안정화가 되지 않는 현상이 발견되었다. 이러한 원인을 모형 시험에서 얻은 롤 댐핑 계수 값이 실제 수중 운동체의 계수 값과의 차이 때문으로 발생하는 것이라 판단하고, 이에 대한 분석을 수행하였다.

5. 시뮬레이션을 통한 롤 계수 추정

해상시험 결과에 나타난 진동 현상을 분석하기 위하여, 대상 수중 운동체의 비선형 운동방정식을 MATLAB Simulink에서 구현하였다. 6자유도 운동 모델과 중력/부력 모델, 제어타각과 유체력 모델, 추력 모델 등으로 구성된 시뮬레이션 도구를 Fig. 5에 나타냈다.

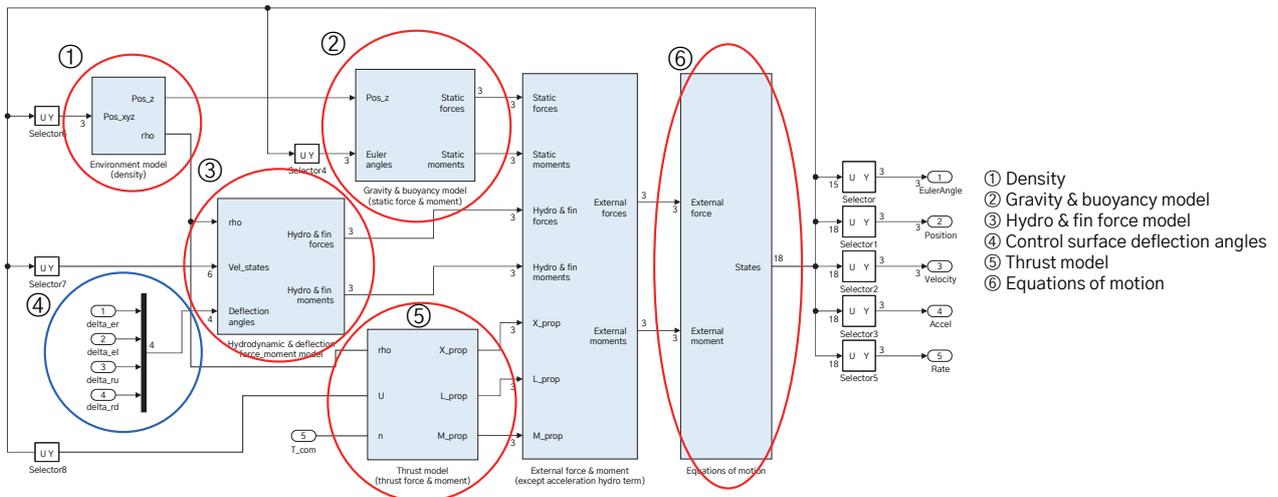


Fig. 5. Nonlinear dynamic model

대상 수중 운동체의 비선형 운동방정식이 구현된 운동 모델에, 해상 시험 시 사용했던 동일한 제어 이득을 적용하고, 롤 댐핑 계수만을 바꿔보면서 해상 발사 시험을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

수중에서 발사관에서 발사된 후, 고속 기동을 위하여 3초경 이후부터 프로펠러가 돌기 시작하는 상황에서의 시험 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델의 한계로 해상 시험과 똑같은 형태의 결과를 모사하진 못했지만, 동일한 제어 페루프 조건 하에서 댐핑 계수를 조절함으로써 해상시험 결과와 유사한 형태의 각속도 진동 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 롤 댐핑 계수 값이 모형 시험 결과에서 획득된 값보다 3배 이상 불안정한 값일 때, 시뮬레이션 결과가 해상 시험 결과와 유사해짐을 확인해 볼 수 있다.

해상 시험 시 적용된 롤 방향 제어 이득은, 모형 시험 결과에서 예상되었던 유체력 계수 값에 맞추어 설계된 값이다. 시뮬레이션을 통하여 추정된 실제의 롤 댐핑 계수가 모형 시험의 예상값보다 불안정하다면, 그 상황에서도 진동현상을 일으키지 않고 안정적인 성능을 보일 수 있도록 수정되어야 한다.

일반적으로 제어 이득 값이 커짐에 따라 수렴 속도가 빨라지고, 평형 상태의 오차 값이 작아지는 이점이 있으나, 제어 대상이 보다 불안정한 상황에서는 진동이 발생하거나, 심한 경우 불안정성을 유발할 수도 있다. 해상 시험 시뮬레이션을 통하여 롤 댐핑 계수 값이 예상값보다 불안정한 것으로 파악되었으므로, 이에 맞는 제어기를 재설계하였고, 결과적으로는 기존 제어 이득보다 작은 제어 이득 값이 적용되었다.

다음 Fig. 7에 재설계된 제어 이득을 적용했을 때 여러 댐핑 계수 값들에 대한 해상시험 상황을 모사한 결과를 도시하였다. 앞의 시뮬레이션을 통해 추정된 댐핑 값보다 실제 댐핑값이 작더라도($K_p/4A$) 발사 초반에 약간의 진동은 발생하나, 곧 안정화되어 6초 이후로는 진동 성분이 없어지는 것을 확인할 수 있다.

6. 수정 제어기가 적용된 해상 시험 결과

앞절의 시뮬레이션을 통하여 추정된 수정 롤 댐핑 계수값에 대해 재설계된 제어기를 적용하여 해상시험을 다시 수행한 결과를 Figs. 8-9에 도시하였다. Fig. 8은

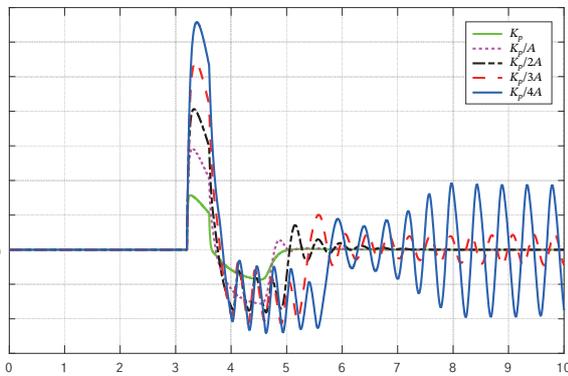


Fig. 6. Simulation results of the variation in roll damping value

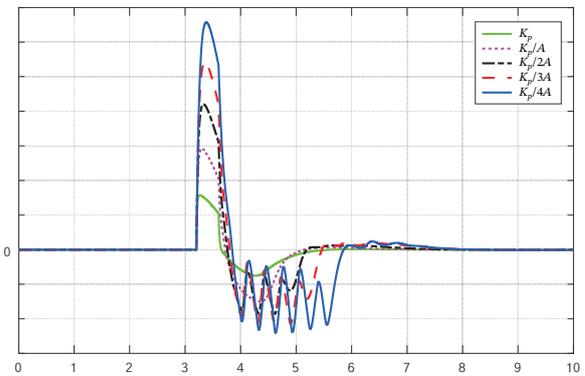


Fig. 7. Simulation results of the redesigned roll control value

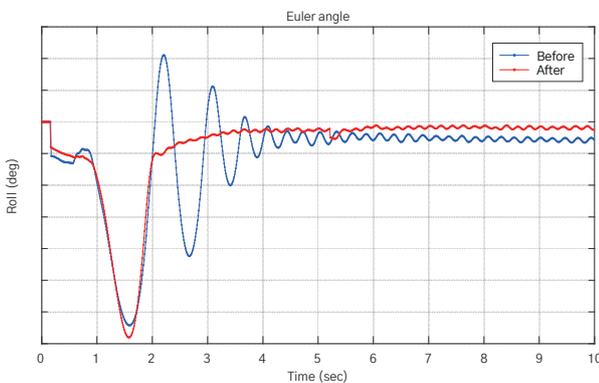


Fig. 8. Sea trial results - roll angle

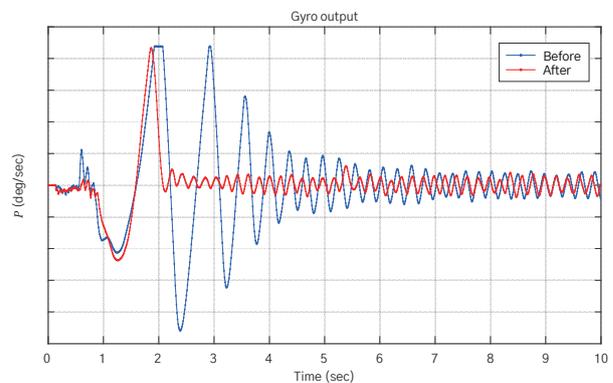


Fig. 9. Sea trial results - roll rate

롤 축의 오일러 각 출력이고 Fig. 9은 내부 자이로스코프 센서에서 측정된 롤 각속도 값이다. 각각 기존 제어기의 결과와 재설계된 제어기의 결과를 겹쳐서 비교할 수 있도록 하였다.

수정 롤 댐핑 계수에 대해 재설계된 제어기를 적용한 결과가 기존 제어기 대비 매우 안정적인 출력을 보임을 확인 가능하고, 이로써 수정 계수 값이 실제와 유사하고, 이에 맞춘 재설계 제어기도 잘 동작하는 것으로 판단할 수 있겠다.

7. 결론

본 논문에서는 고속 주행하는 소형 수중 운동체의 롤 자세 제어와 관련된 연구를 정리하였다. 모형 시험을 통하여 대상 운동체의 조종 운동 방정식의 유체력 미계수를 추정하였으나, 해상시험 결과 롤 방향의 유체력 계수, 특히 롤 댐핑 계수 값에 오차가 크게 있는 것을 확인하였다.

수중 운동체의 비선형 운동 모델에 해상시험에 사용된 제어 이득을 적용하여 해상시험 모사 시뮬레이션을 수행하였고, 해상시험 결과와 비교함으로써 실제 수중 운동체의 보다 정확한 롤 댐핑 계수 값을 유추할 수 있었다. 재추정된 롤 댐핑 계수 값은 모형 시험에서 추정된 값보다 불안정한 값으로 나타났으며, 이에 맞는 제어기를 재설계하였다.

수정된 유체력 계수에 대한 제어기를 적용하여 해상 수중 발사 시험을 재수행하였으며, 실제 시험 결과를 통하여 진동현상이 발생했던 기존 해상시험보다 안정적이고 향상된 롤 제어 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1] T. Lee and S. Kwon, "A Study on Practical PMM Test Technique for Ship Maneuverability Using System Identification Method," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 25-31, 2002.
- [2] B. Jalving, "The NDRE-AUV Flight Control System," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, IEEE, pp. 497-501, 1994.
- [3] T. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [4] C. Hyun, "Decoupled Controller Design of an Autonomous Underwater Vehicle and Performance Test Results," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 768-773, 2013.
- [5] J. C. Song, J. K. Kim, C. W. Park and H. S. Ahn, "Resistance and Propulsion Test of Underwater Vehicle with Pre-twist Angle of Fin," *KSME 2011*, pp. 2075-2079, 2011.
- [6] J. C. Song, Y. H. Shin, C. W. Park and Y. K. Kim, "A Study for the VPMM Test Results of Axis-symmetric Underwater Vehicle with Fin Twist Angle," *The 9th Conference on Marine Weapons*, 2012.
- [7] C. Hyun, "Robust Controller Scheme for Unstable Motion of the High Speed AUV After Launch", *Journal of KIIT*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-8, 2014.