



Received: 2024/12/06
Revised: 2024/12/16
Accepted: 2025/03/12
Published: 2025/03/31

***Corresponding Author:**

Chul Hyun

Maritime R&D Center, 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

수중운동체 구동기의 전달함수 기반 모델링 및 제어 성능 분석

Transfer Function-Based Modeling and Control Performance Analysis of an Underwater Vehicle Actuator

현철^{1*}, 김현승², 김창환¹, 이호진¹

¹LIG넥스원 해양연구소 수석연구원

²LIG넥스원 해양연구소 선임연구원

Chul Hyun^{1*}, Hyunseung Kim², Changhwan Kim¹, Hojin Lee¹

¹Chief research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

²Research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

1. 서론

수중운동체의 제어는 탐사, 구조, 군사 작전 등과 같은 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 한다. 이러한 시스템의 제어 정확성은 운동체의 임무 수행 능력과 직결되며, 특히 발사 초기에 운동체가 겪는 외력과 추진력의 변화를 효과적으로 처리하는 것이 필수적이다. 발사 직후의 과도 상태에서는 외력에 의한 감속, 추진기에 의한 가속, 그리고 롤 동요 등의 외란이 발생[1]하며, 이 과정에서 구동기의 반응 특성은 운동체 전체의 안정성과 응답 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 AUV는 제어핀 또는 다축에 걸친 여러 스러스터를 사용하여 제어력을 확보하며, 이러한 구조는 제어력의 여유가 충분해 외란을 보상하거나 복잡한 운동을 수행하기 유리하다[2-4]. 그러나 본 연구에서 다루는 수중운동체는 이러한 시스템과 달리 추진력은 프로펠러에 의존하고 제어는 오직 꼬리날개의 제어핀을 통해 이루어지는 제한적 구동 시스템이다[1]. 이러한 underactuated 시스템에서는 구동기의 동적 특성이 운동체의 제어 성능에 미치는 영향이 매우 크며, 각종 외란에 대응하는 적절한 제어를 위해 구동기의 반응 특성을 정확히 모델링하는 것이 필수적이다.

본 연구는 구동기의 실제 동작 특성을 반영할 수 있도록 전달함수 형태로 모델링하여, 시뮬레이션에서 시스템 성능을 정확하게 모사하고 평가할 수 있는 기반을 마련하도록 하였다.

Abstract

본 연구는 수중운동체의 제어핀 구동기 동적 특성을 모델링하고, 이를 기반으로 제어 성능을 분석하는 데 초점을 맞춘다. 기존의 다자유도 스러스터 기반 시스템과 달리, 본 연구에서 다루는 수중운동체는 프로펠러와 꼬리날개 제어핀만으로 제어되는 제한적 구동 시스템이다. 이를 위해 해상시험 데이터를 활용하여 구동기의 동적 거동을 1차, 2차, 3차 전달함수 형태로 모델링하였으며, 각 모델의 정확도를 RMS 오차를 기준으로 비교 분석하였다. 본 연구는 구동기 동적 특성을 반영한 모델을 통해 제어 시스템 설계 및 시뮬레이션의 신뢰성을 높이는 데 기여하고자 한다.

This study focuses on modeling the dynamic characteristics of control fin actuators in an underwater vehicle and analyzing their impact on control performance. Unlike conventional multi-thruster systems, the underwater vehicle in this study is a limited actuation system controlled solely by a propeller and tail control fins. To model the dynamic behavior of the actuators, sea trial data were utilized to develop first-, second-, and third-order transfer function models, and their accuracy was evaluated based on RMS errors. This research aims to enhance the reliability of control system design and simulations by incorporating actuator dynamics into the models.

Keywords

자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle),
구동기 모델링(Actuator Modeling),
제어 성능 분석(Control Performance Analysis),
전달함수 기반 모델링(Transfer Function Modeling)

2. 제어핀 형상

수중운동체의 꼬리날개는 전체 시스템의 안정성과 조종 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 수중운동체는 일반적으로 유체역학적 효율성을 높이기 위해 유선형의 외형을 가지며, 꼬리날개는 운동체의 방향을 제어하는 핵심적인 역할을 한다. 특히 고속 이동 중에도 안정적인 조종 성능을 유지하기 위해 꼬리날개의 형상과 배치는 매우 중요한 설계 요소이다.

꼬리날개의 설계 목적은 크게 두 가지이다. 첫째는 유체 저항을 최소화하는 것이며, 둘째는 제어력을 극대화하는 것이다. 이를 위해 꼬리날개는 수평 안정면 역할을 하는 엘리베이터(elevator)와 수직 안정면 역할을 하는 러더(rudder)로 구성된다. 엘리베이터는 수직축을 기준으로 상하 방향의 운동을 제어하고, 러더는 수평축을 기준으로 좌우 방향의 조종을 담당한다. 이러한 두 기능이 결합된 꼬리날개는 운동체의 자세 제어에 중요한 역할을 한다.

본 논문에서 다루는 대상 수중운동체의 기동을 위한 선미 부분의 형상은 Fig. 1과 같다. 프로펠러에 의해서 추진력을 얻고, 제어핀(control fin)을 이용하여 조종력을 획득하는 형태로 구성되어 있다.

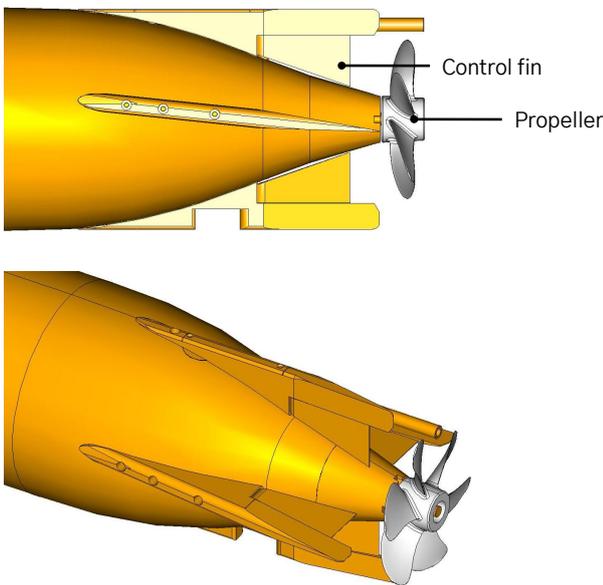


Fig. 1. Underwater vehicle with stabilizers

3. 구동기 모델링 및 성능 분석

본 연구에서는 수중운동체 제어 구동기의 동적 특

성을 정확히 반영하기 위해 해상시험 데이터를 기반으로 한 실증적 모델링 접근법을 채택하였다. 이는 이론적으로 구성 요소들을 세부적으로 모델링하는 전통적 방식 대신 실제 운용 조건에서 수집된 데이터를 활용함으로써 보다 간단하고 정확한 모델을 도출할 수 있다는 장점을 가진다.

구동기의 동적 특성은 n 차 전달함수 형태로 모델링되었으며, 각 차수의 전달함수는 다음과 같이 정의된다.

- 1차 전달함수:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{1 + T_1 s} \quad (1)$$

- 2차 전달함수:

$$G_2(s) = \frac{K_2}{1 + 2\zeta\omega_n s + (\omega_n s)^2} \quad (2)$$

- 3차 전달함수:

$$G_3(s) = \frac{K_3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} \quad (3)$$

여기서, K_1, K_2, K_3 는 시스템의 이득, T_1 은 시간 상수(time constant), ζ 는 감쇠비(damping ratio), ω_n 은 고유 진동수(natural frequency), a_1, a_2, a_3 는 3차 모델의 동적 특성을 나타내는 계수이다.

모델링을 위해 5~10차례의 해상시험 데이터를 활용하였으며, 각 경우마다 네 개의 제어 타각 반응을 대표하는 하나의 모델을 생성하였다. 이를 위해 각 시험 데이터에서 최소자승법(least squares method)을 기반으로 모델의 파라미터를 추정하였으며, 모든 데이터를 통합한 글로벌 최적화를 통해 단일 전달함수를 도출하였다. 이는 여러 시험 조건에서 발생할 수 있는 데이터 간 변동성을 최소화하고, 실제 구동기 특성을 가장 잘 대표할 수 있는 모델을 생성하는 데 중점을 두었다.

추정된 파라미터 값들은 다음과 같다.

- 1차 모델:

$$\begin{cases} K_1 = 0.9952 \\ T_1 = 0.1831 \end{cases} \quad (4)$$

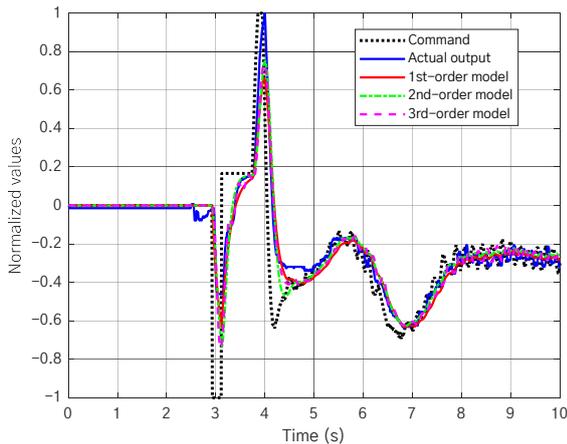
- 2차 모델:

$$\begin{cases} K_1 = 0.9480 \\ \omega_n = 0.0689 \\ \zeta = 0.9999 \end{cases} \quad (5)$$

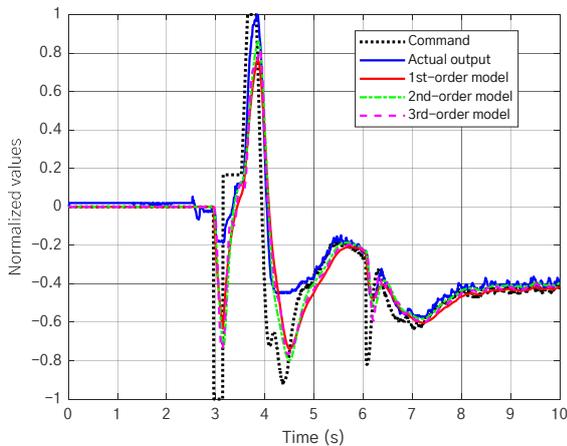
- 3차 모델:

$$\begin{cases} K_3 = 0.9710 \\ a_1 = 1 \\ a_2 = 0.2342 \\ a_3 = 0.0549 \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 2는 해상시험 데이터를 기반으로 한 1차, 2차, 3차 전달함수 모델링 결과를 입력 명령값 및 실제 해상시험 결과와 비교한 그래프로, 대표적인 두 가지 예를 도시하였다. 검은 점선은 입력 명령값, 파란 실선은 실 출력 데이터를 나타내며, 적색, 녹색, 분홍색 선은 각각 1차, 2차, 3차 모델링 결과를 나타낸다.



(a) Representative case 1



(b) Representative case 2

Fig. 2. Comparison of sea trial data and modeled responses

모델의 적합성을 평가하기 위해 각 모델의 예측값과 실제 구동기 응답 간의 RMS(root mean squared) 오차를 산출하였다. 각 모델별로 산출된 RMS 오차값은 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. RMS error comparison of each models

| Model order | RMS error |
|--------------------|-----------|
| First-order model | 0.1368 |
| Second-order model | 0.1425 |
| Third-order model | 0.1386 |

Table 1의 결과에 따르면 1차 모델의 RMS 오차값이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 이는 단순한 모델링 방식으로도 구동기의 동적 특성을 충분히 반영할 수 있음을 나타낸다. 특히, 2차와 3차 모델은 복잡한 형태를 가지지만 성능 지수에서 차별적인 우위를 보이지 않아, 본 연구에서는 1차 모델이 최적의 선택으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 제한적 구동 시스템을 갖춘 수중운동체의 제어 성능을 높이기 위해 구동기의 동적 특성을 모델링하고, 이를 검증하는 과정을 수행하였다. 기존의 다자유도 스터스터 기반 시스템과 달리, 본 연구에서 다중수중운동체는 프로펠러와 꼬리날개 제어핀만을 이용해 제어되며, 이러한 구조적 한계에서 구동기의 동적 특성은 전체 시스템 성능에 중요한 영향을 미친다.

더불어 해상시험 데이터를 기반으로 1차, 2차, 3차 전달함수 모델을 적용하여 구동기의 실제 동작을 정밀히 모사할 수 있는 모델을 개발하였다. 각 모델의 성능을 최소자승법(least squares method)과 RMS 오차 분석을 통해 평가한 결과, 1차 모델이 가장 높은 적합도를 보였다. 이는 구동기의 복잡한 응답 특성을 더욱 충실히 반영할 수 있음을 확인한 결과이다.

본 연구에서 제안된 모델은 해상시험 데이터를 기반으로 한 실증적 접근을 통해 개발되었으며, 이를 시뮬레이션에 반영함으로써 제어 설계 및 성능 검토 과정에서 더욱 높은 신뢰성을 제공할 수 있다. 이러한

결과는 제한적 구동 환경에서 구동기의 동적 특성을 정확히 모델링하는 것이 제어 시스템 설계와 성능 향상에 핵심적인 역할을 한다는 점을 강조한다. 향후 연구에서는 더욱 다양한 운용 조건과 외란 상황을 고려하여 본 연구의 모델을 확장하고, 실시간 제어 시스템에 적용할 가능성을 탐구할 것이다.

참고문헌

- [1] C. Hyun, "Design and Verification of Early Unstable Stage Control Scheme for High-speed Underwater Launched AUV," *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 21, pp. 3574-3583, 2023.
- [2] M. T. Vu, T. -H. Le, H. L. N. N. Thanh, T. -T. Huynh, M. Van, Q.-D. Hoang, and T. D. Do, "Robust Position Control

of an Over-actuated Underwater Vehicle under Model Uncertainties and Ocean Current Effects Using Dynamic Sliding Mode Surface and Optimal Allocation Control," *Sensors*, Vol. 21, No. 3, p. 747, 2021.

[3] Y. Liang, Y. Li, J. Li, H. Wang, and Z. Liu, "Auto-heading Control of an Over-actuated Underwater Vehicle Based on Active Disturbance Rejection Control and Optimal Thrust Allocation," In *Proceedings of the 2023 International Conference on Robotics, Control and Vision Engineering (RCVE 2023)*, pp. 7-12, 2023.

[4] R. P. Steenson, "Control of an AUV from Thruster Actuated Hover to Control Surface Actuated Flight," NATO Research and Technology Organisation (RTO), RTO-MP-AVT-189, pp. 1-12, 2011. Available: https://eprints.soton.ac.uk/207877/1/RTO-MP-AVT-189_-_Steenson_2011.pdf