



Received: 2026/05/30
Revised: 2026/06/12
Accepted: 2026/06/25
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Chul Hyun

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5178-4293
E-mail: chul.hyun@gmail.com

Abstract

자세 응답만으로는 정상주행 중 제어입력에 남아 있는 반복적 활동이 충분히 드러나지 않을 수 있다는 점에서, 본 연구는 AUV 정상 직선주행 중 나타나는 roll-equivalent residual control activity를 해상시험 데이터 기반으로 분석한다. 십자형 4타 구조에서 개별 조종타 command 및 feedback을 roll-equivalent component로 재구성하고, 정상주행 segment의 시간·주파수 특성을 비교하였다. 분석 결과, roll 자세는 안정적으로 유지된 반면 roll-equivalent feedback은 평균 peak-to-peak 7.20 deg, 약 6 Hz dominant frequency의 반복 변동을 보였다. Roll 제어입력 분해 결과 roll-rate 항이 roll-equivalent command와 높은 상관성을 보여, roll-equivalent 재구성이 자세 응답만으로 드러나지 않는 제어입력 활동 분석에 유용함을 확인하였다.

Because residual control-input activity during straight cruising may not be fully apparent from attitude response alone, this study analyzes roll-equivalent residual control activity of an AUV using sea-trial data. For a cross-type four-fin configuration, individual fin commands and feedback signals were reconstructed into roll-equivalent components, and their time- and frequency-domain characteristics were compared across straight-cruise segments. The results show that the roll attitude remained stable, whereas the roll-equivalent feedback exhibited repetitive fluctuation with a mean peak-to-peak amplitude of 7.20° and a dominant frequency near 6 Hz. Decomposition of the roll control input showed that the roll-rate term was strongly related to the roll-equivalent command, confirming the usefulness of roll-equivalent reconstruction for analyzing control-input activity not apparent from attitude response alone.

Keywords

자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle)
Roll-Equivalent 제어입력(Roll-Equivalent Control Input)
Residual Control Activity(Residual Control Activity)
해상시험 데이터(Sea-Trial Data)
제어입력 재구성(Control Input Reconstruction)

AUV 정상 직선주행 중 Roll-Equivalent Residual Control Activity의 시험데이터 기반 분석

Sea-Trial Data-Based Analysis of Roll-Equivalent Residual Control Activity in an AUV During Straight Cruising

현철^{1*}, 이성균¹, 고진용¹, 전우중²

¹LIG디펜스&에어로스페이스 M&S팀 수석연구원

²LIG디펜스&에어로스페이스 M&S팀 선임연구원

Chul Hyun^{1*}, Sungkyun Lee¹, Jinyoung Go¹, Woojoong Jeon²

¹Principal researcher, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

²Senior researcher, M&S Team, LIG Defense&Aerospace

1. 서론

수중운동체의 제어성능은 일반적으로 자세 오차, 안정화 시간, 경로 추종 오차와 같은 상태 응답을 중심으로 평가된다. AUV는 비선형 유체력, 모델 불확실성, 외란의 영향을 받는 시스템이므로 운동 모델링 및 제어기 설계와 함께 시험데이터 기반 검증이 중요한 연구 주제로 다루어져 왔다[1-4].

다중 조종면을 사용하는 수중운동체에서는 상위 제어기에서 생성된 축별 제어명령을 개별 actuator로 분배하기 위해 control allocation 구조가 사용된다[5-7]. 특히 십자형 4타 구조를 갖는 AUV에서는 pitch, yaw, roll 제어명령이 각 조종타에 중첩 및 분산되어 배분되므로, 개별 조종타의 움직임만으로는 특정 축 방향의 제어입력 활동을 직접 해석하기 어렵다. 기존 연구에서는 이러한 control allocation 구조를 이용하여 초기 불안정 구간에서의 자세 안정화 및 시험 검증을 수행한 바 있다[8].

본 연구에서는 정상 직선주행 구간에서 획득한 해상시험 데이터를 이용하여 4개 조종타의 command 및 feedback을 roll-equival-

ent component로 재구성하고, 정상주행 중 나타나는 roll-equivalent fin activity를 분석한다. 본 연구에서는 자세 응답은 안정적이지만 조종타 명령 및 feedback에 남아 있는 반복적 변동 성분을 residual control activity로 정의하고, 그 형성 경로를 분석한다. 이를 위해 정상 직선주행 segment를 분리하고, roll angle, roll-rate, roll-equivalent command 및 feedback의 시간영역 및 주파수영역 특성을 비교한다. 또한 roll 제어입력을 roll angle 기반 항과 roll-rate feedback 기반 항으로 분리하여, 정상주행 중 관측되는 제어입력 활동의 주요 형성 경로를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시험데이터와 4개 조종타 기반 equivalent control input 재구성 방법을 설명한다. 3장에서는 정상 직선주행 구간에서의 roll-equivalent fin activity 특성을 분석하고, 4장에서는 roll-rate feedback 항과 command-feedback 관계를 중심으로 영향요인을 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 정리한다.

2. Roll-Equivalent 제어입력 재구성

2.1 대상 운동체 및 시험데이터 구성

본 연구의 대상은 원통형 형상의 수중운동체이며, 후방부에는 십자형(control cross) 구조의 4개 조종타가 배치되어 있다. 조종타는 upper rudder, lower rudder, right elevator, left elevator로 구성되며, pitch 및 yaw 제어는 각각 elevator 쌍과 rudder 쌍을 이용하여 수행된다. Roll 제어는 별도의 독립 조종면 없이 differential control allocation을 통해 4개 조종타에 분산되어 구현된다.

분석에는 실제 해상시험 과정에서 획득한 AUV 운용 데이터를 사용하였다. 분석 대상은 turn maneuver 이후 운동체가 안정적으로 직선주행을 유지하는 정상주행 구간이며, 전체 시험데이터 중 자세 변화와 심도 변화가 상대적으로 작고 추진 조건이 일정하게 유지되는 구간을 기준으로 총 23개의 정상 직선주행 segment를 선정하였다. 데이터 저장 주기는 0.01 s이며, 각 segment는 약 10 s 길이의 시계열 데이터를 포함한다.

시험데이터에는 IMU 기반 자세 및 각속도 정보,

심도 정보, 추진기 회전수, 그리고 4개 조종타의 command 및 actuator feedback 값이 포함된다. 자세 정보는 roll, pitch, yaw 각도로 구성되며, 각속도 정보는 body frame 기준의 roll-rate p , pitch-rate q , yaw-rate r 로 구성된다.

2.2 4타 조종 구조 및 Control Allocation

대상 운동체의 조종 구조는 Fig. 1과 같이 십자형으로 배치된 4개 조종타를 기반으로 구성된다. Pitch, yaw, roll 축 제어입력은 control allocation을 통해 각 조종타로 분배되며, 각 조종타 command는 pitch 및 yaw 입력과 roll differential 입력이 결합된 형태로 생성된다.

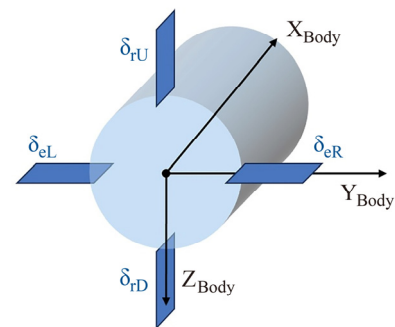


Fig. 1. Cross-type control fin configuration

각 조종타 command는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta_{eR} &= \frac{1}{2}\delta_{pitch} - \frac{1}{4}\delta_{roll} \\ \delta_{eL} &= \frac{1}{2}\delta_{pitch} + \frac{1}{4}\delta_{roll} \\ \delta_{rU} &= \frac{1}{2}\delta_{yaw} + \frac{1}{4}\delta_{roll} \\ \delta_{rD} &= \frac{1}{2}\delta_{yaw} - \frac{1}{4}\delta_{roll}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 δ_{eR} , δ_{eL} , δ_{rU} , δ_{rD} 는 각각 right elevator, left elevator, upper rudder, lower rudder의 command를 의미한다.

Pitch 및 yaw 입력은 elevator 쌍과 rudder 쌍의 공통모드(common-mode) 성분으로 나타나며, roll 입력은 4개 조종타의 차동모드(differential-mode) 성분으로 분배된다. 따라서 개별 조종타 수준에서는 작은 변동으로 나타나는 입력도 roll-equivalent 기

준에서는 보다 명확한 residual control activity로 관측될 수 있다.

2.3 Equivalent Control Component 재구성

본 연구에서는 4개 조종타의 command 및 actuator feedback 데이터를 이용하여 pitch, yaw, roll equivalent component를 식 (2)와 같이 재구성하였다. Pitch 및 yaw equivalent input은 각각 elevator 쌍과 rudder 쌍의 공통모드 성분으로 정의하였으며, roll equivalent input은 4개 조종타의 차동 성분을 조합하여 구성하였다.

$$\begin{aligned}\delta_{pitch,eq} &= \delta_{eR} + \delta_{eL} \\ \delta_{yaw,eq} &= \delta_{rU} + \delta_{rD} \\ \delta_{roll,eq} &= -\delta_{eR} + \delta_{eL} + \delta_{rU} - \delta_{rD}\end{aligned}\quad (2)$$

Actuator feedback 데이터에 대해서도 동일한 방식으로 equivalent component를 구성하였다. 재구성된 roll-equivalent input은 개별 조종타 수준에서는 명확히 드러나지 않는 differential control activity를 분석하는 데 사용하였다.

2.4 분석 지표

정상주행 중 roll-equivalent fin activity를 정량화하기 위해 시간영역 및 주파수영역 지표를 함께 사용하였다. 시간영역 지표로는 peak-to-peak amplitude, RMS(root mean square), 그리고 total variation(TV)을 사용하였다. Peak-to-peak amplitude는 전체 변동폭을 나타내며, RMS는 평균값 제거 후 fluctuation 크기를 나타낸다.

Total variation은 식 (3)과 같이 시간에 따른 equivalent input 변화량의 누적합으로 정의되며, 조종타 활동량을 함께 반영하기 위한 지표로 사용하였다.

$$TV = \sum_{k=1}^{N-1} |\delta(k+1) - \delta(k)| \quad (3)$$

여기서 N 은 segment 내 샘플 수이며, $\delta(k)$ 는 k 번째 샘플에서의 equivalent input을 의미한다.

주파수영역에서는 dominant frequency와 spectral characteristic을 비교하여 정상주행 중 나타나는 residual control activity의 반복 특성을 확인하

였다. 또한 roll angle, roll-rate gyro output, roll-equivalent command 및 feedback 간의 관계를 비교하여, 이후 제어입력 활동의 형성 경로를 분석하기 위한 기초 자료로 활용하였다.

3. 정상 직선주행 중 Roll-Equivalent Fin Activity 특성 분석

3.1 분석 개요

본 장에서는 2장에서 정의한 roll-equivalent command 및 feedback을 사용하여 정상 직선주행 segment 23개의 시간영역 및 주파수영역 특성을 분석한다. 본 장의 목적은 정상주행 성공 여부 평가가 아닌, 안정적으로 유지된 직선주행 상태에서 반복적으로 나타나는 residual control activity의 특성 분석에 있으며, 자세 응답 자체보다 roll-equivalent control activity의 반복성과 분포 특성에 초점을 둔다.

3.2 정상주행 Segment별 Roll-Equivalent Feedback 특성

Fig. 2는 전체 정상 직선주행 segment에 대해 재구성한 roll-equivalent feedback의 peak-to-peak amplitude, total variation, 그리고 dominant frequency를 나타낸다. 또한 Table 1에는 전체 segment에 대한 통계값을 정리하였다.

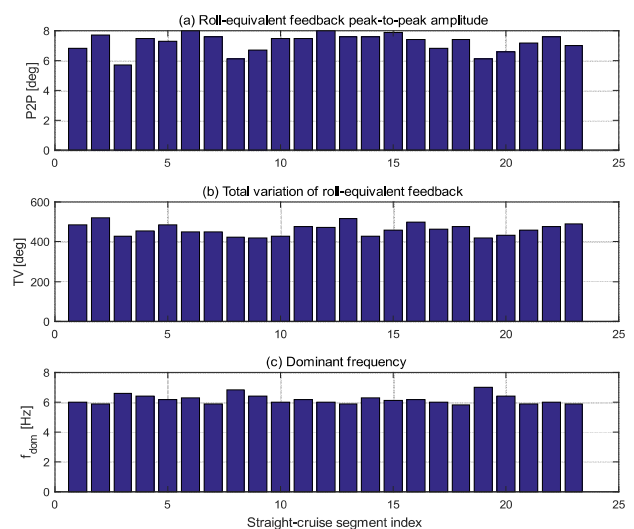


Fig. 2. Roll-equivalent feedback characteristics across segments

Table 1. Statistical summary of roll-equivalent feedback activity over 23 straight-cruise segments

Metric	Mean	Std	Median	Max
p2p amplitude [deg]	7.20	0.63	7.40	8.00
RMS [deg]	1.38	0.15	1.37	1.65
Total variation [deg]	461.8	30.3	460.3	519.2
Dominant frequency [Hz]	6.10	0.34	6.10	7.00

분석 결과, 모든 정상주행 segment에서 roll-equivalent feedback은 일관된 반복적 fluctuation 특성을 나타냈다. Peak-to-peak amplitude와 total variation은 segment에 따라 일부 차이를 보였으나 전체적으로 유사한 범위 내에서 유지되었으며, dominant frequency 역시 대부분의 segment에서 일정 범위에 집중되었다(Table 1). 이는 해당 residual control activity가 특정 과도구간에 국한된 현상이 아니라 정상주행 상태에서 반복적으로 나타나는 제어입력 특성임을 보여준다.

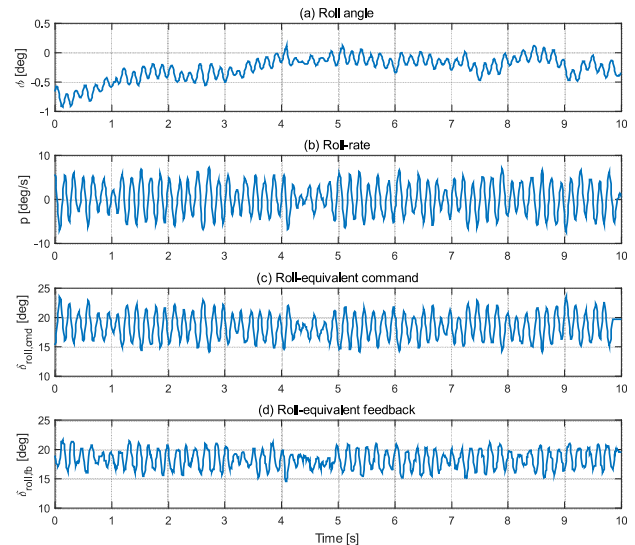
또한 개별 조종타 수준에서는 상대적으로 제한적인 변동이 관측되었으나, differential combination 형태로 재구성한 roll-equivalent component에서는 보다 명확한 fluctuation 특성이 나타났다. 이는 control allocation 기반의 조종 구조에서 개별 조종타의 미세한 입력 변화가 roll-equivalent control channel에서는 보다 크게 나타날 수 있음을 보여준다.

3.3 Representative Segment의 시간영역 특성

Fig. 3는 representative segment에 대한 시간영역 데이터를 나타낸다. 그림에는 roll angle, roll-rate gyro output, roll-equivalent command, 그리고 roll-equivalent feedback이 함께 제시되어 있다.

분석 결과, 정상주행 구간에서 roll angle은 약 ± 1 deg 이내에서 유지되어 자세 변화는 제한적이었다. 반면 roll-rate gyro output에는 약 ± 5 deg/s 수준의 반복적 fluctuation이 지속적으로 관측되었으며, roll-equivalent command 및 feedback도 평균 성분을 중심으로 유사한 반복 성분을 나타냈다.

또한 roll-equivalent command와 feedback은 유사한 fluctuation pattern을 나타냈으며, 반복적인 주기 특성이 시간영역에서 확인되었다. 반면 roll angle에서는 동일 수준의 반복 성분이 상대적으로 명확

**Fig. 3.** Representative straight-cruise segment responses

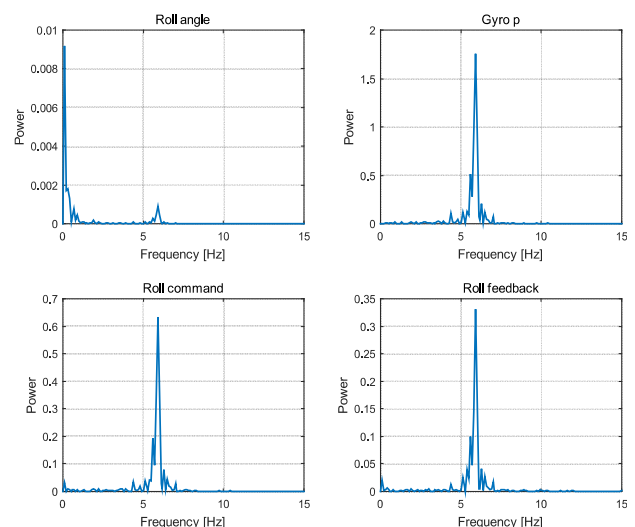
하게 나타나지 않았다.

이러한 결과는 정상주행 상태에서 관측된 residual control activity가 단순한 자세각 변화와는 다른 특성을 가질 가능성을 보여준다.

3.4 주파수영역 특성 분석

Fig. 4는 representative segment에 대해 roll angle, roll-rate gyro output, roll-equivalent command, 그리고 roll-equivalent feedback의 주파수 스펙트럼을 비교한 결과를 나타낸다.

Roll angle의 경우 상대적으로 저주파 성분이 우세

**Fig. 4.** Frequency characteristics of roll control activity

하게 나타났으며, 정상주행 중 큰 자세 진동은 관측되지 않았다. 반면 roll-rate gyro output과 roll-equivalent command 및 feedback에서는 특정 주파수 부근에서 반복적인 dominant peak가 관측되었다.

또한 전체 정상주행 segment에 대한 분석 결과, roll-equivalent feedback의 dominant frequency는 대부분 유사한 범위에 분포하였으며, 특정 segment에서만 독립적으로 나타나는 형태는 관측되지 않았다. 이는 정상주행 중 관측된 residual control activity가 단순한 random noise 형태라기보다, 일정한 반복 특성을 가지는 제어입력 활동임을 보여준다.

특히 roll-rate gyro output, roll-equivalent command, roll-equivalent feedback은 유사한 주파수 대역에서 dominant peak를 나타낸 반면, roll angle은 상대적으로 저주파 특성을 유지하였다. 정상주행 중 나타나는 residual control activity의 형성 경로는 4장에서 제어기 내부 입력 항과 command-feedback 관계 분석을 통해 살펴본다.

4. Roll-Rate Feedback 기반 Residual Control Activity 영향요인 분석

4.1 분석 개요

3장에서 확인된 residual control activity의 형성 경로를 분석하기 위해, 본 장에서는 roll 제어입력을 roll angle 기반 항과 roll-rate feedback 기반 항으로 분리하여 기여도를 비교하고, command와 actuator feedback 사이의 관계를 함께 검토한다.

4.2 Roll 제어입력 항 분리 방법

실제 대상 운동체의 제어구조는 control allocation, actuator dynamics[9], 입력 제한, 구동기 내부 응답 특성 등을 포함하는 복합 구조로 구성된다. 그러나 본 연구의 목적은 정상주행 중 관측된 residual control activity의 주요 형성 경로를 식별하는 데 있으므로, roll 제어입력을 roll angle 기반 항과 roll-rate feedback 기반 항으로 분리하여 분석하였다. 분석에는 시험 당시 적용된 roll 제어 gain을 사용하였다.

Roll 제어입력의 주요 성분은 식 (4)와 같이 표현할

수 있다.

$$u_{roll} = -K_{\phi}\phi - K_p\dot{\phi} \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 roll angle, $\dot{\phi}$ 는 roll-rate gyro output을 의미한다. K_{ϕ} 와 K_p 는 각각 roll angle feedback gain과 roll-rate feedback gain이다. 본 연구에서는 첫 번째 항을 P-term, 두 번째 항을 D-term으로 구분하여 계산하였다.

정상 직선주행 구간에서는 개별 조종타 command가 actuator limit에 근접하지 않았으므로, 본 분석에서는 입력 포화에 의한 비선형 효과보다는 roll angle 및 roll-rate feedback 항의 상대적 기여도에 초점을 두었다.

각 segment에 대해 u_p , u_D , roll-equivalent command를 계산하였으며, RMS, dominant frequency, 주파수대역 에너지, 그리고 roll-equivalent command와의 상관계수를 비교하였다.

4.3 Roll Control Activity Pathway 분석 결과

Fig. 5는 roll angle 기반 P-term과 roll-rate feedback 기반 D-term의 기여도, command-feedback 관계, 그리고 주요 주파수대역 에너지를 비교한 결과를 나타낸다. Table 2에는 본 장에서 수행한 pathway analysis의 주요 정량 지표를 종합하였다.

정상 직선주행 구간에서 roll angle 자체의 변동은 제한적이었으며, 이에 따라 P-term의 크기도 제한적

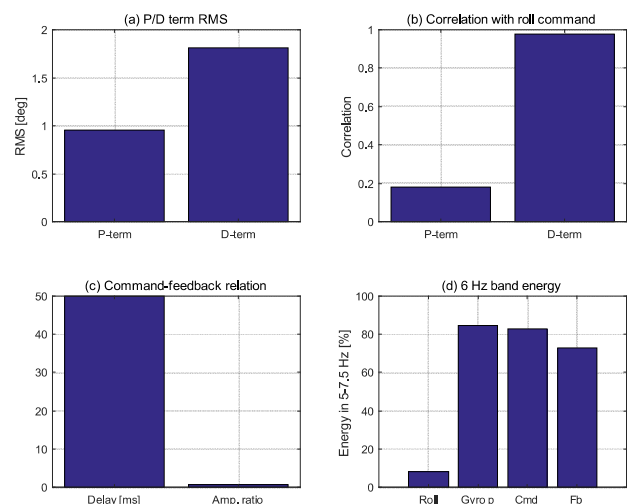


Fig. 5. Contribution analysis of roll control components

Table 2. Summary of roll control activity pathway analysis

Metric	Mean	Std
Roll angle std. [deg]	0.317	0.212
Roll-rate RMS [deg/s]	3.026	0.359
P-term RMS [deg]	0.951	0.635
D-term RMS [deg]	1.815	0.215
D/P RMS ratio [-]	2.490	1.106
Corr.(P, Cmd) [-]	0.180	-
Corr.(D, Cmd) [-]	0.978	-
Max. Cmd-Fb Corr [-]	0.889	0.025
Cmd-Fb Delay [ms]	50.0	0.0
Fb/Cmd Amp. Ratio [-]	0.734	0.017

인 수준으로 나타났다. 반면 D-term은 roll-rate gyro output에 포함된 반복 성분을 반영하여, roll-equivalent command와 유사한 시간영역 및 주파수 영역 특성을 보였다. 전체 23개 segment에서 D/P RMS ratio는 평균 2.49, roll-equivalent command와의 상관계수는 P-term의 경우 평균 0.180, D-term의 경우 평균 0.978로 나타났다. 주파수영역에서도 roll-rate gyro output, D-term, roll-equivalent command는 유사한 주파수 대역에서 dominant peak를 보인 반면, roll angle 및 P-term은 상대적으로 저주파 특성을 유지하였다. 이는 정상주행 중 관측된 roll-equivalent command fluctuation이 roll angle 오차보다는 roll-rate feedback 항과 강하게 연관되어 있음을 보여준다.

다음으로, command 단계에서 형성된 fluctuation이 실제 actuator feedback으로 어떻게 전달되는지를 확인하기 위해 command와 feedback 사이의 관계를 분석하였다. 전체 segment에서 command와 feedback 사이의 최대 상관계수는 평균 0.889, 평균 지연은 약 50 ms, feedback의 진폭은 command 대비 평균 약 0.734배 수준이었다. 즉, roll-equivalent feedback은 command와 동일한 반복 성분을 포함하되 일정한 지연과 진폭 감쇠를 동반하는 형태로 추종하였다.

이상의 결과를 종합하면, 정상주행 중 관측된 residual control activity는 actuator feedback에서 독립적으로 발생한 현상이라기보다, roll-rate feedback 항을 통해 roll-equivalent command에 형성된 반복 성분이 actuator response를 거치며 지연 및

감쇠된 형태로 나타난 것으로 해석할 수 있다. 정상주행 구간에서 개별 조종타 command는 actuator limit에 근접하지 않았고 특정 조종타에서만 발생하는 이상 응답도 관측되지 않았으므로, actuator saturation 또는 개별 구동기 이상이 주요 원인일 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 이는 roll 자세 안정성만으로는 제어계의 세부 동작 특성을 충분히 설명하기 어려울 수 있으며, 시험데이터 기반 제어특성 분석에서 자세 응답뿐 아니라 equivalent control input, command-feedback 관계, actuator activity 등 제어입력 기반 지표들을 함께 검토할 필요가 있음을 시사한다.

5. 결론

본 연구에서는 실제 해상시험 데이터를 이용하여 정상 직선주행 중 나타나는 AUV의 roll-equivalent residual control activity를 분석하였다. 대상 운동체는 십자형 구조의 4개 조종타를 사용하며, roll 제어입력은 differential control allocation을 통해 각 조종타에 분배된다. 본 연구에서는 개별 조종타의 command 및 feedback 데이터를 roll-equivalent component 형태로 재구성하고, 정상주행 상태에서 나타나는 제어입력 활동 특성을 시간영역 및 주파수영역에서 분석하였다.

분석 결과, 정상 직선주행 상태에서 roll 자세는 안정적으로 유지되었음에도 불구하고, roll-equivalent command 및 feedback에서는 반복적인 residual control activity가 지속적으로 관측되었다. 전체 23개 정상주행 segment에서 roll-equivalent feedback의 peak-to-peak amplitude는 평균 7.20 deg로 나타났으며, per-fin normalized 기준으로는 평균 1.80 deg 수준이었다. 또한 roll-equivalent feedback의 dominant frequency는 약 6 Hz 부근에서 일관되게 나타났다. 이는 개별 조종타 수준에서는 제한적으로 보이는 입력 변동이 differential combination 기반의 roll-equivalent component에서는 보다 명확한 residual activity로 관측될 수 있음을 보여준다.

제어입력 항을 분리하여 분석한 결과, roll-equivalent command는 roll angle 기반 P-term보다 roll-rate feedback 기반 D-term과 훨씬 높은 연관성

을 보였다. 전체 정상주행 segment에서 P-term과 roll-equivalent command 사이의 평균 상관계수는 0.180으로 낮게 나타난 반면, D-term과 roll-equivalent command 사이의 평균 상관계수는 0.978로 나타났다. 이는 정상주행 중 관측된 residual control activity가 roll angle 오차보다는 roll-rate feedback 경로를 통해 주로 형성되었음을 의미한다.

또한 command와 actuator feedback 사이의 관계를 분석한 결과, actuator feedback은 command를 평균 약 50 ms 지연 및 약 0.734배 진폭으로 추종하는 특성을 나타냈다. 정상주행 구간에서 actuator saturation이나 특정 조종타의 독립적인 이상 응답은 관측되지 않았으므로, 본 연구에서 확인된 residual control activity는 개별 actuator 이상이라기 보다 roll-rate feedback 기반 제어명령과 actuator response 특성이 결합된 페루프 제어활동으로 해석할 수 있다.

본 연구는 정상주행 성능의 성공 또는 실패를 평가하는 것이 아니라, 안정적으로 운용된 시험데이터에 남아 있는 제어입력 활동 특성을 분석하고 그 형성 경로를 해석하는 데 목적이 있다. 본 연구에서 제시한 roll-equivalent reconstruction 기반 분석 방법은 향후 수중운동체 제어기 설계, actuator modeling, 시험데이터 기반 M&S 검증 과정에서 residual control activity를 해석하기 위한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만 본 연구는 단일 해상시험 조건의 정상 직선주행 구간을 대상으로 수행되었으며, 다양한 운용 조건 및 필터-구동기 내부 제어루프-센서 신호 특성 등 제어계 세부 요소의 영향에 대한 추가 검토가 향후 과제로 남는다.

참고문헌

- [1] Thor I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Jan Petrich & Daniel J. Stilwell, 'Model Simplification for AUV Pitch-Axis Control Design,' *Ocean Engineering*, VOL. 37, NO. 7, 2010, pp. 638-651.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.11.007>
- [3] Jan Petrich & Daniel J. Stilwell, 'Robust Control for an Autonomous Underwater Vehicle That Suppresses Pitch and Yaw Coupling,' *Ocean Engineering*, VOL. 38, NO. 1, 2011, pp. 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.007>
- [4] K. N. Cho, D. C. Seo, & H. S. Choi, 'A Study on an Input-Output Controller Based on the Time-Scale Properties of an Underwater Vehicle Dynamics,' *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, VOL. 45, NO. 5, 2008, pp. 469-476.
- [5] Tor A. Johansen & Thor I. Fossen, 'Control Allocation—A Survey,' *Automatica*, VOL. 49, NO. 5, 2013, pp. 1087-1103. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>
- [6] Chengren Yuan, Changgeng Shuai, Jianguo Ma, & Yuan Fang, 'An Efficient Control Allocation Algorithm for Over-Actuated AUVs Trajectory Tracking with Fault-Tolerant Control,' *Ocean Engineering*, VOL. 273, 2023, Article 113976. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113976>
- [7] Yung-Yue Chen, Chun-Yen Lee, Ya-Xuan Huang, & Tsung-Tso Yu, 'Control Allocation Design for Torpedo-Like Underwater Vehicles with Multiple Actuators,' *Actuators*, VOL. 11, NO. 4, 2022, Article 104. <https://doi.org/10.3390/act11040104>
- [8] Chul 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, 2023, pp. 3574-3583. <https://doi.org/10.1007/s12555-023-0390-y>
- [9] Chul Hyun, Hyunseung Kim, Changhwan Kim, & Hojin Lee, 'Transfer Function-Based Modeling and Control Performance Analysis of an Underwater Vehicle Actuator,' *Journal of KNST*, VOL. 8, NO. 1, 2025, pp. 105-108. <https://doi.org/10.31818/JKNST.2025.3.8.1.105>