한국항해항만학회지 제48권 제3호
J. Navig. Port Res. Vol. 48, No. 3 : 214-220, June 2024 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2024.48.3.214

자율운항선박 원격제어 관련 제어 데이터와 운용자의 적합성 평가 방법

노화섭* · 김홍진** · † 임정빈

*한국해양대학교 산학연구교수, **한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 해사인공지능·보안학부 교수

Suitability Evaluation Method for Both Control Data and Operator Regarding Remote Control of Maritime Autonomous Surface Ships

Hwa-Sop Roh · Hong-Jin Kim** · † Jeong-Bin Yim*

**Researcher Professor, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Republic of Korea*
***Graduated School of Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Republic of Korea*
† Professor, Dept. of Maritime AI and Cyber Security, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Republic of Korea

요 약 : 원격제어는 자율운항선박의 원격 운용에 적용하기 위한 것으로, 운용자가 원격제어 시스템에서 생성되는 제어 데이터를 이용하여 수행한다. 성공적인 원격제어를 위해서는 원격제어 3원칙(안전성, 신뢰성, 가용성)의 준수가 필요한데, 이를 위해서 우선적으로 제어 데이터와 운용자 양쪽에 대한 원격제어 적합성이 확보되어야 한다. 또한, 원격제어 적합성 평가를 위해서는 실제 선박에 대한 실험이 필요한데, 현재 이와 관련된 국제규정이 마련되어 있지 않고, 실제 선박에 대한 실험은 위험하며, 많은 비용과 시간이 걸리는 등의 문제가 있다. 본 연구의 목적은 실제 선박조종에 사용된 제어장치들의 출력 값을 이용한 적합성 평가 방법의 개발에 있다. 이 연구에서는 선박 제어장치의 출력 값을 제어 데이터로 이용한 데이터 적합성과 출력 값에 대한 운용자의 추종 값을 이용한 운용자 적합성 등의 2가지 방법을 제안하였다. 실험은 국립한국해양대학교 실습선 '한나라'호의 원격제어를 위해 구성된 육상 원격제어 시스템을 이용하였다. 실험방법은 실습선의 제어장치에서 출력된 값에 대한 운용자의 추종 값을 획득함과 동시에 이 추종 값이 포함된 추종 데이터를 선박과 육상 사이에서 송수신하는 절차의 반복과정을 통해 수행하였다. 평가 결과, 데이터에 관한 송수신 성능은 원격운용에 적합한 것으로 나타났으나, 운용자의 추종 성능은 더 많은 교육과 훈련이 필요한 것으로 분석되었다. 그래서 제안한 평가방법은 원격제어의 3원칙 확보에 필요한 제어 데이터와 원격 운용자 양쪽의 적합성 평가와 분석에 적용 가능함을 알았다.

핵심용어 : 자율운항선박, 원격제어, 제어 적합성, 제어 데이터, 운용자

Abstract *: Remote control is used for operating maritime autonomous surface ships. The operator controls the ship using control data generated by the remote control system. To ensure successful remote control, three principles must be followed: safety, reliability, and availability. To achieve this, the suitability of both the control data and operators for remote control must be established. Currently, there are no international regulations in place for evaluating remote control suitability through experiments on actual ships. Conducting such experiments is dangerous, costly, and time-consuming. The goal of this study is to develop a suitability evaluation method using the output values of control devices used in actual ship operation. The proposed method involves evaluating the suitability of data by analyzing the output values and evaluating the suitability of operators by examining their tracking of these output values. The experiment was conducted using a shore-based remote control system to operate the training ship 'Hannara' of Korea National Maritime and Ocean University. The experiment involved an iterative process of obtaining the operator's tracking value for the output value of the ship's control devices and transmitting and receiving tracking data between the ship and the shore. The evaluation results showed that the transmission and reception performance of control data was suitable for remote operation. However, the operator's tracking performance revealed a need for further education and training. Therefore, the proposed evaluation method can be applied to assess the suitability and analyze both the control data and the operator's compliance with the three principles of remote control.*

Key words *: maritime autonomous surface ships, remote control, control suitability, control data, operators*

† Corresponding author : 종신회원, jbyim@kmou.ac.kr 051)410-4246
* 정회원, sulya@kmou.ac.kr 051)410-4856
** 정회원, hjkim@exstar.co.kr 02)581-1171
(주) 이 논문은 "자율운항선박의 원격제어 지연이 충돌에 미치는 영향 식별을 위한 실험방법의 고찰"란 제목으로 "2023년도 한국항해항만학회 추계학술대회 및 Asia Navigation Conference 2023 프로그램북(부산 아르피나, 2023.11.2-5, pp.95-97)"에 발표되었음.

1. 서 론

원격제어는, 자율운항선박(Maritime Autonomous Surface Ships, MASS)의 원격운용에 적용하기 위한 것으로, 운용자가 원격제어시스템에서 생성되는 제어 데이터를 이용하여 수행한다. 현재 자율운항선박은 총 4수준 중에서 수준2(선원이 승선하지만 원격제어 가능)와 수준3(선원 승선의 최소화 또는 일부 자율운항 수준에서 원격제어 가능) 사이에서 연구 개발되고 있다. 아울러 원격제어 역시 자율운항선박과 병행하거나 또는 독립하여 연구 개발되고 있다(Yim, 2021, Lee and Yim, 2023).

현재 논의가 진행 중인 MASS Code(2023)에 의하면 원격제어는 3원칙(안전성 Safety, 신뢰성 Reliability, 가용성 Availability)의 준수가 요구되고 있다. 원격제어의 3원칙을 준수하기 위해서 우선적으로 원격제어시스템에서 송수신하는 데이터의 무결성(integrity)이 검증되어야 하고, 운용자는 원격제어를 적합하게 제어해야 한다.

아울러, 이러한 무결성과 운용자의 적합성은 함께 평가되어야 하는데, 그 이유는 원격제어시스템이 비정상인 경우 운용자는 적합한 제어를 할 수 없고, 시스템이 정상인 경우라도 운용자의 교육과 훈련이 충분하지 않은 경우 적합한 원격제어를 보장할 수 없기 때문이다(Yim, 2019a; Yim, 2019b).

본 연구의 목적은 실제 선박에 대한 원격제어를 수행하기 이전에 원격제어 데이터의 무결성과 운용자의 제어적합성 양쪽을 동시에 검증할 수 있는 평가방법을 제안하기 위한 것이다. 제안한 방법은 국립한국해양대학교 실습선 '한나라'호의 원격제어에 적합하도록 구성된 원격제어 시스템을 이용한 실험을 통하여 검증하고 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 원격제어 모델

원격제어는 다양한 요소(선박, 환경, 통신, 운용자 등)가 상호작용하기 때문에 제어 관계가 복잡하다. 이에 본 연구에서 제안한 평가방법은 복잡한 원격제어 관계를 정의한 원격제어 모델을 기반으로 개발하였다.

Fig. 1은 원격제어 모델을 나타낸다. 원격제어는 선박의 추정상태 $\hat{x}$을 데이터 처리장치(S-Data Processor)를 통해 육상 원격제어센터(Remote Control Centre, RCC)로 전송하면서 시작한다. RCC에서는 운용자가 가시화시스템(Visual System)을 통해 구체화된 $\hat{x}$에 대해서 제어상태 u을 생성하여 선박으로 전송하고, 선박에서는 u에 대해서 제어된 선박의 추정상태 $\hat{x}$을 다시 RCC로 전송하는 등의 반복과정을 통해 구현된다.

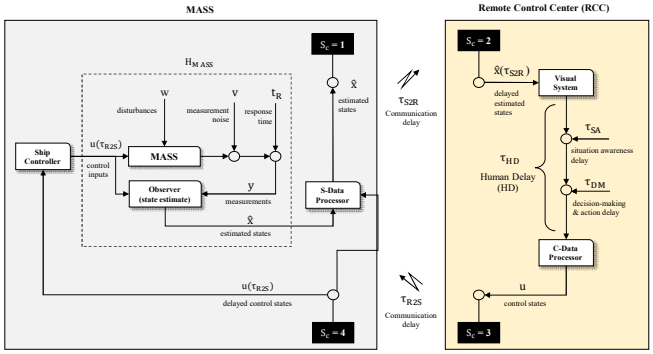


Fig. 1 Remote control model

이러한 원격제어는 선박에 승선한 선원이 직접 제어하는 것과 비교하여 더 어려운 것으로 알려져 있는데, 그 원인 중 하나는 선박의 응답시간과 통신지연, 인적지연 등에 의해 발생하는 선박의 추정상태 $\hat{x}$와 제어상태 u 사이의 시간차이이다. 이러한 시간차이가 발생하는 과정과 원인은 다음과 같다. 아래 설명은 1회의 원격제어를 4상태(states, s)로 구분한 것으로, c ($c=1,2,..n,n$은 총 제어횟수)회의 제어에 대한 제어상태 s_c을 $s_c=[(c-1)\times 4]+m(m=1,2,3,4)$로 표현한 것이다.

첫 번째 제어($c=1$)의 4상태는 다음과 같다.

1) ($c=1, s_c=1$)에서 선박의 추정상태 $\hat{x}_{(c=1,s=1)}$는 주어진 제어상태 $u_{(c=0,s=4)}$와 측정 값 $y_{(c=1,s=1)}$에 대한 조건부 함수 $\hat{x}_{(c=1,s=1)}=f(y_{(c=1,s=1)}|u_{(c=0,s=4)})$로 나타낼 수 있는데, 여기서 $u_{(c=0,s=4)}$는 ($c=1, s=1$) 이전에 형성된 제어상태를 나타낸다. 측정값은 $y_{(c=1,s=1)}=H_{MASS}(w,v,t_R|u_{(c=0,s=4)})$로 나타낼 수 있는데, H_{MASS}는 선박조종 특성을 의미하고, w,v,t_R은 외란(disturbance), 측정 잡음(measurement noise), 선박응답시간(response time) 등을 나타낸다.

2) ($c=1, s_c=2$)에서 RCC는 통신지연 τ_{S2R}이 개입되기 때문에 선박에서 송신한 $\hat{x}_{(c=1,s=1)}$을 $\hat{x}_{(c=1,c=2)}=\hat{x}_{(c=1,s=1)}(\tau_{S2R})$의 형태로 수신한다.

3) ($c=1, s_c=3$)에서 운용자는 $\hat{x}_{(c=1,s=2)}$에 대해 원격제어를 실시하고, 그 결과는 $u_{(c=1,s=3)}=f(\hat{x}_{(c=1,s=2)},\tau_{HD})$의 형태로 출력하는데, 여기서 τ_{HD}는 인적지연을 나타낸 것으로 $\tau_{HD}=\tau_{SA}+\tau_{DM}$이고, τ_{SA}, τ_{DM}은 상황인식지연, 의사결정지연을 각각 나타낸다.

4) ($c=1, s_c=4$)에서 선박은 $u_{(c=1,s=4)}=u_{(c=1,s=3)}(\tau_{R2S})$의 형태로 제어상태를 수신하는데, τ_{R2S}는 통신지연을 나타낸다.

이어서 두 번째 제어($c=2$)에 대한 4상태를 설명하면 다음과 같다.

5) ($c=2, s_c=1$)에서 선박은 위의 1)항과 마찬가지로 $c=2$ 이전의 $c=1$에 대한 $u_{(c=1,s=4)}$에 의해 제어되고, 그 결과는 $\hat{x}_{(c=2,s=1)}$과 $y_{(c=2,s=1)}$로 출력한다.

6) 계속해서 $(c=2, s_c=2)$, $(c=2, s_c=3)$, $(c=2, s_c=4)$ 등의 제어과정을 반복한다.

위와 같이, 원격제어는 과거 제어상태와 현재 선박상태가 혼재되고 각 제어상태 별 다양한 요소가 개입되기 때문에 이러한 관계를 운영자가 고려할 수 없는 경우 성공적인 원격제어를 보장할 수 없어서 원격제어 3원칙의 준수는 어렵다.

그래서 실제 선박에 대해 원격제어는 원격제어 데이터와 운용자에 대한 적합성이 확보된 이후에 실시할 것이 요구된다.

2.2 제어 데이터와 운용자의 원격제어 적합성 평가방법

제어 데이터에 대한 원격제어 적합성은 원격제어센터와 선박 사이의 송수신 데이터 수를 이용한 3종 비율(R_{A-B}, R_{B-A}, R_{A-A})을 이용하여 평가하였다. 여기서 R_{A-B}, R_{B-A}, R_{A-A}는 육상(A)과 선박(B) 사이, B와 A 사이, A와 A 사이의 송수신 데이터 수의 비율(%)을 다음 식(1)으로 각각 계산한 것이다.

$$\begin{cases} R_{A-B} = [N_B(t_{RX}) / N_A(t_{TX})] \times 100 \\ R_{B-A} = [N_A(t_{RX}) / N_B(t_{TX})] \times 100 \\ R_{A-A} = [N_A(t_{RX}) / N_A(t_{TX})] \times 100 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $N_A(t_{TX})$, $N_A(t_{RX})$, $N_B(t_{TX})$, $N_B(t_{RX})$는 데이터 수를 나타낸 것으로, t_{TX}시간에 육상에서 송신한 것, t_{RX} 시간에 육상에서 수신한 것, t_{TX}시간에 선박에서 송신한 것, t_{RX} 시간에 선박에서 수신한 것을 각각 나타낸다.

운용자에 대한 원격제어 적합성은 다음 식(2)을 이용하여 계산할 수 있는 선박제어장치의 출력 값에 대한 운용자의 추종성능(Performance, P)을 이용하여 평가하였다.

$$P(t_r) = [(V_{ref} - V_{diff}(t_r)) / V_{ref}] \times 100 \quad (2)$$

여기서 V_{ref} 는 선박제어장치의 최대 제어범위의 값을 나타내고, $V_{diff}(t_r)$는 t_r시간의 평균 차이를 나타낸 것으로 다음 식(3)으로 구한 것이다.

$$V_{diff}(t_r) = \sqrt{(\overline{V}_{ship}(t_r) - \overline{V}_O(t_r))^2} \quad (3)$$

여기서 $\overline{V}_{ship}(t_r)$는 선박제어장치 출력 값 평균을 나타내고, $\overline{V}_O(t_r)$는 운용자의 추종 값 평균을 나타낸 것으로 다음 식(4)으로 계산한 것이다.

$$\begin{cases} \overline{V}_{ship}(t_r) = (1/n_{ship}(t_r)) \sum_{t=t_a}^{t_b} V_{ship}(t) \\ \overline{V}_O(t_r) = (1/n_O(t_r)) \sum_{t=t_a}^{t_b} V_O(t) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $t_r (t_a < t_r < t_b)$는 시간 t_a와 t_b의 범위를 갖는 시간을 나타내고, $n_{ship}(t_r)$와 $n_O(t_r)$는 t_r시간의 범위에서 선박의 실제 출력 데이터 수와 운용자의 추종 데이터 수를 각각 나타낸다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치와 실험 환경

실험 장치는 국립한국해양대학교 원격제어센터에 구축한 원격제어시스템을 이용하였는데, 이 원격제어시스템은 실습선 '한나라'호의 5종 선박제어장치(러더, 엔진, 텔레그래프, 선수 쓰러스터, 선미 쓰러스터)를 제어하기 위한 목적으로 구성한 것이다.

Fig.2는 실습선 '한나라'호의 5종 선박제어장치의 실제 모습(상단 그림)과 5종 선박제어장치를 원격제어시스템을 이용하여 제어하기 위한 육상제어장치의 모습(하단 그림)을 나타낸다.

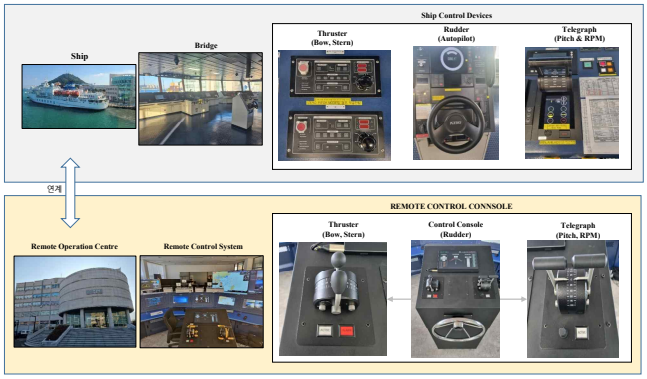


Fig. 2 Ship's control devices(upper) and remote control devices(lower)

Table 1은 실습선 '한나라'호의 제원(Hanjin, 2019)을 나타낸다. 5종 선박제어장치의 제어범위와 특징은 다음과 같다.

1) 러더의 조타각도 범위는 -35°(Port 35°) ~ +35°(Starboard 35°)이다.

2) 엔진 회전수는 결합모드(Combinator mode)에서 +144rpm(Ahead) ~ -144rpm(Astern)인데, 총 11단계의 텔레그래프 명령에 따라 구분된 엔진회전수는 전진(Ahead)의 단계별 회전수와 후진(Astern)의 단계별 회전수가 부분적으로 동일하지 않은 것이 특징이다(Table 1 하단에 설명).

3) 엔진을 수준(level) 별로 제어하기 위한 텔레그래프는 전진(Ahead)과 후진(Astern) 사이의 수준이 총 11단계로 구분되어 있다.

4) 선미 쓰러스의 회전각은 21.2°/min이고, 선수 쓰러스터의 회전각은 분당 25.6°/min인데 선속(kts)에 따라서 쓰러스터 효과(%)가 변하는 특징이 있다. Table 1의 하단에 나타낸 바와 같이 0.0kts에서 100% 효과가 발생하고 5.5kts에서 0.0%의 효과가 발생한다.

제어 데이터와 운용자에 대한 원격제어 적합성은 위의 '한나라'호의 제원을 이용하여 평가하고 분석하였다.

Table 1 Particulars of training ship 'HANNARA'

Particular	Description
Type of vessel	Special Purpose Ship(SPS)
Displacement(ton)	9,122
Length overall(m)	133.0
Breath(m)	19.4
Speed(knots), rpm	17.7/144 (combinator mode)
Type of propeller	Controllable Pitch(CPP), 6,618 KW x 146rpm
Steering	P35 and S35 (maximum)
Engine(rpm)[1] , Combinator mode	144 (maximum)
Telegraph level	11 levels
Bow Thruster(°/min)[2] , Power	25.6, 1000kW
Stern Thruster(°/min), Power	21.2, 900kW

1) Engine(rpm): Navigation full, 141.0; Full ahead, 130.0; Half ahead, 126.0; Slow ahead, 100.0; Dead slow ahead, 73.0; Stop engines, 0.0, Dead slow astern, 110.0, Slow astern, 121.0; Half astern, 127.0, Full astern, 135.0, Emergency astern, 141.0
2) Bow Thruster: 0.0kts, 100%; 4.1kts, 75%; 4.9kts, 50%; 5.2kts, 25%; 5.5kts, 0.0%

Fig. 3은 원격 운용자의 실험장면을 나타낸다. 실험은 2023년 11월 30일 1시간동안(0900시~1000시) 부산항 남단에서 실습선 항해 중 실시하였고, 실험방법은 다음과 같다.

Step 1: 실습선 '한나라'호의 5종 제어장치들에 대한 실제 출력 값을 원격제어센터에서 획득한다.

Step 2: '한나라'호의 5종 출력 값을 운용자가 지속적으로 추종하여 추종 값을 생성한 후 추종 데이터로 변환한다.

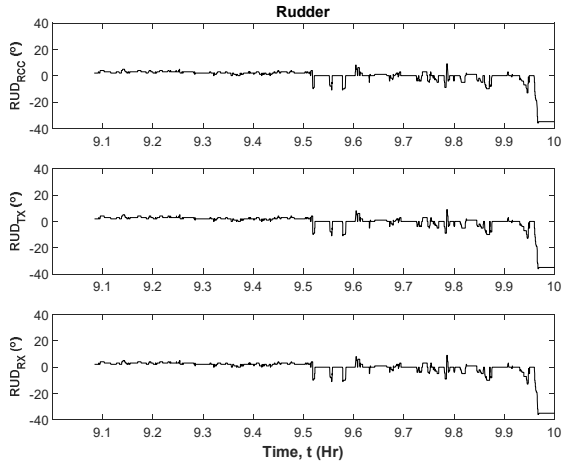
Step 3: 원격제어센터와 선박 사이에서 추종 데이터의 송수신을 반복한다.

Step 4: 위의 과정에서 송수신한 추종 데이터를 이용하여 송수신 비율(%)을 계산하고, 실습선의 5종 출력 값과 운용자의 5종 추종 값 사이의 차이를 이용하여 추종 성능(%)을 계산한다.

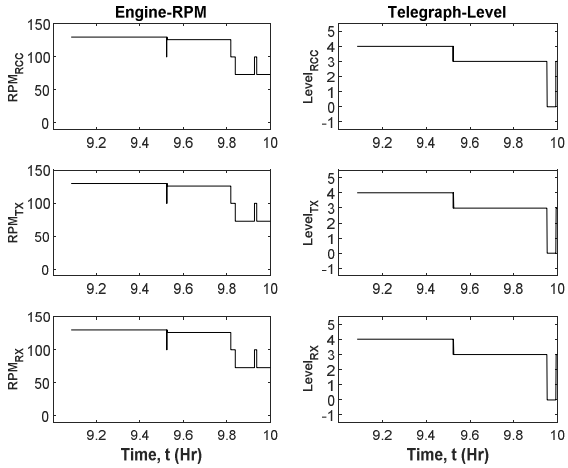
Fig. 3 Snap-shot for experiment environments.

3.2 추종 데이터의 원격제어 적합성 평가결과

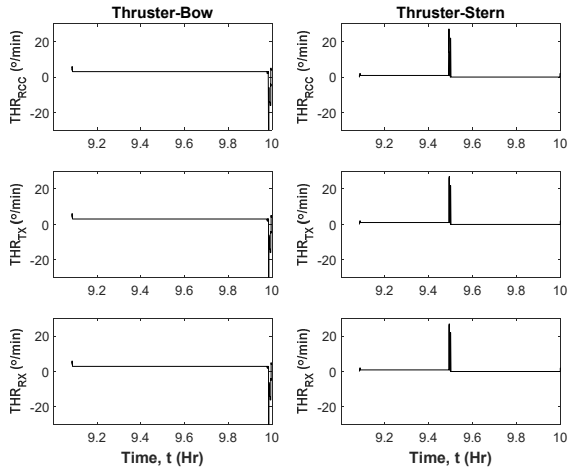
Fig. 4는 운용자가 추종한 데이터의 송수신 결과로서, 상단 그림들은 육상에서 선박으로 송신한 데이터, 중간 그림들은 선박에서 수신한 데이터, 하단 그림들은 다시 육상에서 수신한 데이터를 나타내고, (a), (b), (c)는 러더, 엔진과 텔레그래프, 선수와 선미 쓰러스터를 각각 나타낸다. Fig. 4를 보면, 송수신 데이터에 포함된 값들은 서로 유사함을 볼 수 있다.



(a) Rudder



(b) Engine(left) and Telegraph(right)



(c) Bow-thruster(left) and Stern-thruster(right)

Fig. 4 Data transmission results

Table 2는 송수신한 추종 데이터의 평가결과를 나타낸다. N-AB, N-BA, N-AA는 데이터 수를 나타낸 것으로, 육상에서 선박으로 송신한 것, 선박에서 육상으로 수신한 것, 육상에서 송신하고 다시 육상에서 수신한 것을 각각 나타내고, R-AB, R-BA, R-AA는 위의 식(1)을 이용하여 계산한 데이터 송수신 비율(%)을 나타낸다.

송수신 데이터 수는 1시간동안 최대 5254회, 최소 5130회로 나타나서 초당 최대 1.46회(5254회/3600초)와 초당 최소 1.43(5130회/3600초)회의 빈도로 나타나고, 데이터 송수신 비율(%)은 모두 100%로 나타나서 송수신 데이터의 무결성을 확인하였다.

Table 2 Ratio for five-type data transmission.

Devices	Number of data			Ratio(%)		
	N-AB	N-BA	N-AA	R-AB	R-BA	R-AA
Rudder	5130	5130	5130	100	100	100
ENG-RPM	5254	5254	5254	100	100	100
TLG-Level	5254	5254	5254	100	100	100
THR-Bow	5130	5130	5130	100	100	100
THR-Stern	5130	5130	5130	100	100	100

Remarks: Rudder, Rudder angle; ENG-RPM, Engine RPM; TLG-Level, Telegraph level; THR-Bow, Bow Thruster; THR-Stern, Stern Thruster.

Table 3은 송수신 데이터에 포함된 5종 추종 값들에 대한 4통계(최대 Max, 최소 Min, 평균 Mean, 표준편차 Std)를 나타낸 것으로, 송수신 데이터의 품질을 검토하기 위한 것이다.

러더각도(°)의 통계 값(Max 9, Min -36)은 최댓값이 제어범위(+35 ~ -35)에 있지만 최솟값은 1° 초과한다. 엔진회전수(rpm)의 통계 값(Max 130, Min 73)은 최댓값과 최솟값이 제어범위(+144 ~ -144)에 있다. 텔레그래프 수준의 통계 값(Max 4, Min 0)은 최댓값과 최솟값이 제어범위(+5 ~ -5)에 있다. 선수 쓰러스터 회전각도(°/min)의 통계 값(Max 6.0, Min -43.0)은 최댓값이 제어범위(+25.6 ~ -25.6)에 있으나 최솟값은 18.0°/min 초과한다. 선미 쓰러스터 회전각도(°/min)의 통계 값(Max 27.0, Min 0.0)은 최댓값이 제어범위(+21.2 ~ -21.2)에서 5.8°/min 초과하고, 최솟값은 제어범위에 있다.

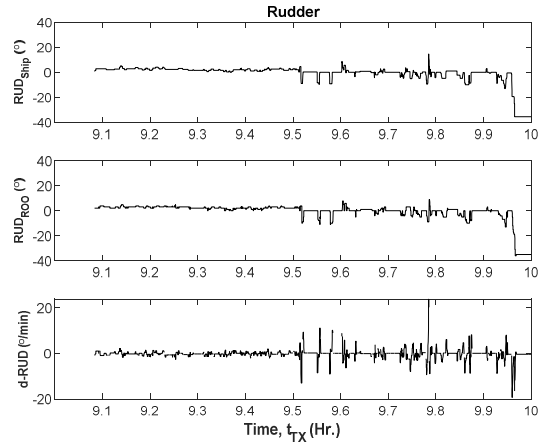
위의 결과, 추종 값들은 선박제어장치들의 제어범위에서 주로 나타났지만, 부분적으로 제어범위를 초과하는데 이것은 운용자의 육상제어장치 조작 미숙에 의한 것으로 고려된다. 한편 실습선의 5종 제어장치 출력 값 역시 선체에 가해지는 외란에 의해서 초과 값이 발생하는 것으로 나타났고, 그래서 운용자 평가는 출력 값과 추종 값 양쪽을 이용하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

Table 3 Statistics for tracking values followed by operator

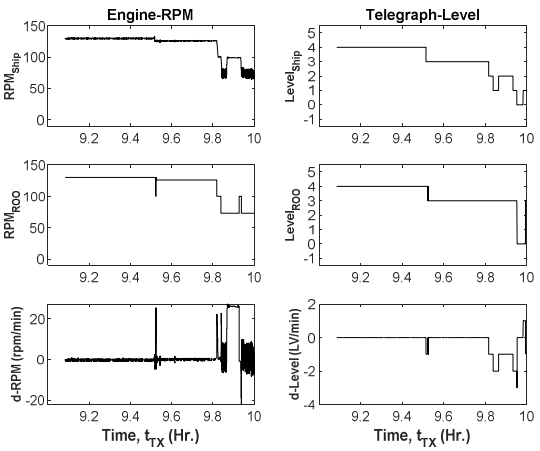
Devices	Max	Min	Mean	Std
Rudder(°)	9.0	-36.0	-0.78	7.56
TLG-RPM(rpm)	130	73	118.23	20.89
TLG-Level	4	0	3.34	0.88
THR-Bow(°/min)	6.0	-43.0	2.74	2.67
THR-Stern(°/min)	27.0	0.0	0.51	1.24

3.3 운용자의 원격제어 적합성 평가결과

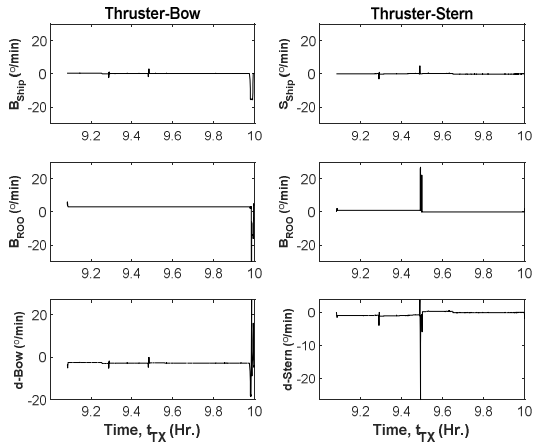
Fig. 5는 실습선의 5종 출력 값(상단)과 출력 값에 대한 운용자의 추종 값(중간) 그리고 이들 사이의 차이(하단)를 나타낸 것으로, (a), (b), (c)는 러더, 엔진과 텔레그래프, 선수와 선미 쓰러스터를 각각 나타낸다.



(a) Rudder



(b) Engine(left) and Telegraph(right)



(c) Thruster-Bow(left) and Thruster-Stern(right)

Fig. 5 Tracking values followed by operator

Fig. 5에서, 러더각도(a)에 대한 차이(d-RUD)는 러더각도 변화가 큰 9.5시~10시 사이에서 크게 발생한다. 엔진회전수(b)의 차이(d-RPM)(좌측)는 9.8시~10시 사이에서 크게 발생하고 9.4시~9.6시 사이에서 피크 값이 발생한다. 텔레그래프 수준(b)의 차이(d-Level)(우측)는 9.8시~10시 사이에서 큰 차이가 발생한다. 선수 쓰러스터(c)의 차이(d-Bow)(좌측)는 10시 부근에서 큰 차이가 발생하고, 선미 쓰러스터(c)의 차이(d-Stern)(우측)는 9.4시~9.6시 사이에서 큰 차이가 발생한다.

이와 같이 5종 제어장치의 출력 값과 운용자의 출력 값은 시간에 따라 부분적으로 큰 차이가 발생함을 보인다.

Table 4는 Fig. 5에 대한 운용자의 추종성능 평가결과를 나타낸 것으로, 차이(Difference)는 실습선의 5종 출력 값과 추종 값 사이의 차이에 대한 4통계(Max 최대, Min 최소, Mean 평균, Std 표준편차)를 나타내고, 성능(Performance)은 위의 식(2)으로 계산한 추종성능의 4통계를 나타낸다.

Table 4 Tracking performances of operator

Devices	Differences				Performance(%)			
	Max	Min	Mean	Std	Max	Min	Mean	Std
Rudder(°)	23.7	-19.3	-0.16	2.17	155.14	32.29	100.47	6.21
TLG-RPM(rpm)	27.3	-22.2	1.82	6.87	114.8	81.8	98.79	4.58
TLG-Level	1	-3	-0.21	0.56	400.0	0.00	121.20	55.88
THR-Bow(°/min)	27.05	-18.5	-2.73	1.53	172.27	-5.66	110.67	5.96
THR-Stern(°/min)	3.8	-26.5	-0.38	0.92	225.0	82.08	101.78	4.32

러더각도(Rudder(°))에서, 차이의 통계 값(Max 23.7, Min -19.3, Mean(Std) -0.16(2.17))은 최댓값과 최솟값이 선박 러더각도 범위(+35 ~ -35)에서 나타나고 평균 -0.16°의 차이가 발생한다. 성능(%)의 통계 값(Max 155.14, Min 32.29, Mean(Std) 100.47(6.21))은 100%(±0.01%)의 목표성능에 대해서 최댓값은 55.14%p 크고, 최솟값은 67.71%p 작으며 평균값은 0.47%p 크다. 여기서 %p는 퍼센테이지 포인트(percentage point)를 나타낸다.

엔진 회전수(ENG-RPM(rpm))에서, 차이의 통계 값(Max 27.3, Min -22.2, Mean(Std) 1.82(6.87))은 최댓값과 최솟값이 선박 엔진 회전수 범위(+144 ~ -144)에서 나타나고 평균 1.82rpm의 차이가 발생한다. 성능(%)의 통계 값(Max 98.79, Min 81.8, Mean(Std) 98.79(4.58))은 목표성능에 대해 최댓값은 1.21%p 작고, 최솟값은 18.2%p 작으며 평균값은 1.21%p 작다.

텔레그래프 수준(TLG-Level)에서, 차이의 통계 값(Max 1, Min -3, Mean(Std) -0.21(0.56))은 최댓값과 최솟값이 실습선 텔레그래프 범위(+5 ~ -5)에 있고 평균 -0.21수준의 차이가 발생한다. 성능(%)의 통계 값(Max 400.0, Min 0.0, Mean(Std) 121.2(55.88))은 목표성능에 대해서 최댓값은 300%p 크고, 최솟값은 100%p 작으며 평균값은 21.2%p 크다.

선수 쓰러스터 회전속도(THR-Bow(°/min))에서, 차이의 통계 값(Max 27.05, Min -18.5, Mean(Std) -2.73(1.53))은 선수 쓰러스터 회전각도의 범위(+25.6 ~ -25.6)에서 최댓값은 1.45°/min 크고, 최솟값은 이 범위에 있으며, 평균 -2.73°/min의 차이가 발생한다. 성능(%)의 통계 값(Max 172.27, Min -5.66, Mean(Std) 110.67(5.96))은 목표성능에 대해 최댓값은 72.27%p 크고 최솟값은 105.66%p 작으며 평균값은 10.67%p 크다.

선미 쓰러스터의 회전속도(THR-Stern)(°/min)에서, 차이의 통계 값(Max 3.8, Min -26.5, Mean(Std) -0.38(0.92))은 선미 쓰러스터 회전속도의 범위(+21.2 ~ -21.2)에서 최댓값은 이 범위에 있으나 최솟값은 5.3°/min 작고 평균 -0.38°/min의 차이가 발생한다. 성능(%)에 관한 통계 값(Max 225.0, Min 82.08, Mean(Std) 101.78(4.32))은 목표성능에 대해 최댓값은 125.0%p 크고 최솟값은 17.92%p 작으며 평균값은 1.78%p의 차이를 보인다.

위의 결과, 운용자의 추종성능은 100%(±0.01%)의 목표성능에 대해 러더각도(0.47%p)가 가장 우수하고, 이어서 엔진회전수(1.21%p), 선미 쓰러스 회전속도(1.78%p), 선수 쓰러스터 회전속도(10.67%p), 텔레그래프 수준(21.2%p) 등의 순서로 나타났다. 그래서 운용자의 추종성능은 5종 제어장치 모두 100%(±0.01%)의 목표성능을 만족하지 못하고, 특히 텔레그래프와 쓰러스터에 관한 교육과 훈련이 더 필요함을 알았다.

4. 결 론

본 연구에서는 원격제어 데이터와 운용자에 대한 원격제어 적합성 평가방법을 제안하였다. 실습선 '한나라'호의 5종 제어장치의 출력 값을 이용한 적합성 평가결과는 다음과 같다.

1) 데이터의 송수신 비율은 100%로 나타나서 송수신 데이터의 무결성을 확인하였다.

2) 운용자의 추종성능은 5종 제어장치의 출력 값에 대해서 100%(±0.01%)의 목표성능과 비교하여 평균 0.47%p ~ 21.2%p의 차이를 나타냈다.

위의 결과, 송수신 데이터는 원격제어에 적합한 것으로 나타났으나, 운용자는 텔레그래프와 쓰러스터에 관한 교육과 훈련이 더 필요한 것으로 나타났다.

제안한 방법은 현재 국내외적으로 개발되고 있는 원격제어의 적합성 평가방법에 관한 한 가지 방법으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 실제 선박의 원격제어 실험을 통한 운용자의 평가와 교육 및 훈련에 관해 연구할 예정이다.

후 기

이 논문은 2024년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 '자율운항선박 기술개발사업(20200615, 자율운항선박 육상제어 기술개발)'의 연구결과입니다.

References

[1] Hanjin(2019), Maneuvering Booklet of HANNARA, Hanjin Heavy Industries & Construction, pp. 1-28.

[2] Lee, H. W. and Yim, J. B.(2023), "Identifying Analog Guage Needle Objects Based ont Image Processing for a Remote Survey of Maritime Autonomous Surface Shps", J. Navig. Port Res., Vol. 47, No. 6, pp. 410-418.

[3] MASS Code(2023), Draft International Code of Safety for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS CODE), September 8th, 2023 (underway)

[4] Yim, J. B.(2019a), "Estimating the Behavior Path of Seafarer Involved in Marine Accidents by Hidden Markov Model", J. Navig. Port Res., Vol. 43, No. 3, pp. 160-165.

[5] Yim, J. B.(2019b), "Analysis of Seafarers' Behavioral Error on Collision Accidents", J. Navig. Port Res., Vol. 43, No. 4, pp. 237-242.

[6] Yim, J. B.(2021), "Effect of Turning Characteristics of Maritime Autonomous Surface Ships on Collision Avoidance", J. Navig. Port Res., Vol. 45, No. 6, pp. 298-305.

Received 27 February 2024
Revised 18 March 2024
Accepted 18 March 2024