

네트워크 기반의 간이 선박조종 시뮬레이터 개발

최원진* · 김효일** · † 전승환

*한국해양대학교 석사과정생, **오사카대학 박사과정수료, † 한국해양대학교 항해학부 교수

Development of the Ship Manoeuvring PC Simulator Based on the Network

Won-jin Choi* · Hyo-Il Kim** · † Seung-Hwan Jun

*Student, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Student, Graduate School of Osaka University, Osaka, Japan

† Professor, Division of Navigation Science, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

요 약 : 선박의 조종운동특성은 선종뿐만 아니라 같은 선박이라 할지라도 속도나 흘수에 의해서도 달라진다. 최근에 초대형선박이 크게 증가하고 있어 해양사고 발생 시 막대한 물질, 환경적 피해가 발생할 수 있으며, 이에 따라 선박조종의 중요성은 더욱 커지고 있다. IMO는 STCW 95 개정협약서를 통해서 해기사들이 시뮬레이터를 이용한 교육을 받도록 강제하고 있다. 그러나 Full Mission Ship Handling Simulator(FMSS)는 고가일 뿐만 아니라 사용하는 데에 제한이 많고, PC기반의 시뮬레이터는 서로 다른 사용자가 함께 시뮬레이션을 할 수 없다는 단점이 존재한다. 본 연구는 네트워크를 기반으로 두 사람이 각자의 PC를 이용하여 함께 시뮬레이션을 할 수 있도록 하여 FMSS와 PC기반의 시뮬레이터가 갖는 단점을 해결하고자 Nomoto 응답모델의 해석 및 수치계산과 레이더 기능 구현, 데이터통신 프로토콜 설계, Graphic User Interface(GUI) 구축 등을 통해 네트워크 기반의 시뮬레이터를 구현하였다. 그리고 개발된 시뮬레이터의 유효성을 검증하기 위해 한국선급, IMO의 선박조종성기준에 따라 시뮬레이션 결과와 한국해양대학교 한바다호의 실선시험결과를 비교·분석하였다. 항목별 시험결과를 정리하면 상대오차 범위는 0 ~ 32.1%, 평균 13.7% 이었으며, IMO 선박조종성기준을 모두 만족하였다.

핵심용어 : 조종운동특성, 시뮬레이터, 네트워크, 노모토 응답모델, 선박조종성기준

Abstract : The characteristics of the manoeuvring motion of a ship are dependent on the ship type, as well as draft or speed in the same ship. In recent years, the number of extra-large vessels has increased significantly, which can cause enormous material and environmental damage in the event of a marine accident. Thus, the importance of ship maneuvering is increasing. The IMO has forced the officers to be trained in simulators through the STCW 95 amendment. However, FMSS is costly and difficult to access and the PC-based simulator has the disadvantage that only one person can engage in simulation. The purpose of this study was to solve the shortcomings of the FMSS and PC-based simulators by enabling multiple people to use their PCs to simulate based on a network. The simulator is implemented through the analysis and numerical calculation of the Nomoto model, Radar function mounting, data transfer protocol design, and GUI building. To verify the simulator, the simulation results were compared and analyzed with the test results of T.S. HANBADA according to the criteria of the Korean Register of Shipping(KR) and IMO standards for ship maneuverability. As a result, It showed a relative error of 0% ~ 32.1% with an average of 13.7%, and it satisfied the IMO criteria for ship maneuverability.

Key words : Manoeuvring Characteristic, Simulator, Network, Nomoto Model, Ship Manoeuvrability Standards

1. 서 론

선박의 조종운동특성은 선종 및 크기에 따라 차이가 크며, 같은 선박이라 할지라도 속력에 따라서도 달라진다. 특히, 발라스트 항해와 만선 항해의 선박조종운동특성은 확연히 차이가 난다. 따라서 항해사에게 필요한 가장 중요한 기술의 하나는 자신이 조종하는 선박의 조종운동특성을 신속히 파악하여 국제해상충돌방지규칙에서 정하는 적절한 피항동작을 할 수

있도록 조타명령을 하는 것이다.

그러나 항해사는 모든 선종이나 제원의 선박을 승선할 수 없기 때문에 대부분 선박조종 시뮬레이터를 이용하여 조종해봄으로써 다양한 선박의 조종운동특성을 경험한다. IMO는 STCW 95 개정협약서를 통해서 해기사들이 시뮬레이터를 이용한 교육을 받도록 강제하고 있다(STCW 95, 1995). 이에 따라 해기사를 양성하는 대학 및 교육기관에서는 선박조종 시뮬레이터 장비를 이용하여 교육하고 있다.

† Corresponding author : 종신회원, korjun@kmou.ac.kr 051)410-4245

* 정회원, choenjeen@kmou.ac.kr 051)410-4881

** 정회원, likim@hanmail.net 051)410-4881

(주) 이 논문은 “네트워크 기반의 간이 선박조종 시뮬레이터 개발”이란 제목으로 “2010 공동학술대회 한국항해항만학회논문집(목포해양대학교, 2010.4.22.-24., pp.91-93.)”에 발표되었음.

하지만 Full Mission Ship Handling Simulator(FMSS)는 대규모의 고가 장비를 이용하여 실제 환경과 거의 유사하게 구축되는 반면 비용이 적게는 수억에서 많게는 수십억원이 들어가는 단점이 있다. 또한, 이러한 시뮬레이터를 동작시키기 위해서는 전문적인 운영요원의 도움이 필요하며, 유지보수 비용도 많이 발생한다. 따라서 정작 시뮬레이터를 활용해서 선박의 조종운동특성을 배우고자 하는 사람들이 접근하기에는 매우 제한적이다. 이러한 FMSS의 단점을 극복하기 위하여, PC 기반의 자립형 시뮬레이터를 개발한 연구사례들이 있다 (Yang, 1999; Son et al., 1998; Song et al., 1995). 그러나 기존의 PC 기반 선박조종 시뮬레이터는 네트워크가 연결되어 있지 않아 단독으로 조종 실습을 할 수밖에 없는 환경이었다. 본 연구에서는 FMSS와 PC기반의 시뮬레이터가 갖고 있는 문제점들을 해소하기 위하여, 네트워크 기반의 간이 시뮬레이터를 개발하고자 하였다. 선박조종 시뮬레이션에서 멀티유저(Multi-user)기능은 큰 의미를 갖는다. 기존의 PC기반 선박조종 시뮬레이터에도 상대선이라는 개념이 있지만, 그것은 가상선박이 정해진 선속으로 미리 프로그램된 경로를 움직일 뿐이다. 본 연구의 시뮬레이터에서는 단독으로 조종연습을 할 수 있을 뿐 아니라, 상대선박을 실제 다른 사람의 의도에 따라 조종하게 함으로써 ‘국제해상충돌방지규칙’에서 중요하게 다루고 있는 여러 상황(Give-way vessel, Stand-on vessel, Head-on, Crossing, Overtaking 등)들을 연습해 볼 수 있다.

연구내용은 크게 시스템설계를 위한 이론적 설명, 시뮬레이션 개발 및 검증으로 구분된다. 제2장에서는 시뮬레이터를 구현하기 위한 선박조종운동 모델, RADAR 기능, 데이터통신 프로토콜에 관해 기술하였다. 제3장에서는 시뮬레이터의 하드웨어 구성을 설명하고 실제로 멀티유저모드로 시뮬레이터를 작동시켜 데이터통신 및 레이더 기본기능 등이 제대로 구현되는지 확인하였다. 제4장에서는 구현한 시뮬레이터의 성능을 검증하였다. 이를 위해서 선급 및 강선규정(Korean Register, 2009)에서 정하고 있는 조타기 성능기준과 IMO에서 선박조종성표준(IMO, 1993)으로 정한 초기선회성능시험(Initial turning ability test), 정상선회성능시험(Normal turning ability test), 지그재그시험(Zig-zag test) 기준을 충족하는지 검증하였다. 이와 함께 국제공인기준은 아니지만 신침로거리시험(Distance of new course test), 외부환경시험을 통해서 시뮬레이터의 완성도를 확인하였으며, 아울러 Jung et al.(2008)이 측정한 한국해양대학교 실습선 ‘한바다호’의 조종성능지수(K, T)를 본 논문에서 개발한 시뮬레이터에 적용하여 한바다호의 실제시험결과와 비교하였다.

2. 시뮬레이터의 구성 및 이론

2.1 선박조종운동 모델

시뮬레이터 개발을 위한 선박조종운동의 수학적모델에 관해

서는 대표적으로 Son et al.(1998)의 연구를 들 수 있다. 본 연구를 통해서 개발하고자 하는 시뮬레이터는 조타동작에 따른 선박의 기본적인 조종운동특성을 이해하고, 안전한 항행을 위하여 여러 충돌위험상황에서 선박조종기술, 적절한 조타 시점과 타각을 익히기 위한 것이다.

선박을 강체(rigid body)라 간주할 때, 조종운동은 Fig. 1과 같이 좌표 원점을 무게중심 G 에 둔 선체고정좌표계 $G-xyz$ 에 대해서 기술된다. 여기서 δ 는 타각(rudder angle), β 는 표류각(drift angle), r 은 선회각속도, u 와 v 는 각각 전후방향속도와 좌우방향속도, V 는 u 와 v 의 합속도를 의미한다. 그리고 조종운동은 타력 및 추진력과 외력 등에 의한 복합운동(coupled motion)으로 정식화할 수 있다. 이러한 관점에서 Nomoto et al.(1957)이 제안한 응답모델은 타의 변화에 대한 회두각속도의 응답을 표시한 수학적모델로 비교적 간단하며 선체의 조종운동을 유체력의 관점이 아니라 주어진 힘(타각의 변화)에 대한 선체의 응답(회두운동)의 관계로서 나타낸 모형으로 수식이 선형항으로만 표시되는 장점을 갖고 있어 본 연구의 선박조종운동을 위한 수학적모델로 채택하였다. Nomoto의 응답모델은 Im(2003)의 연구에서도 적용된 바 있다.

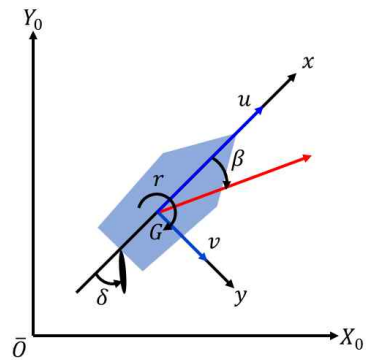


Fig. 1 Ship-fixed coordinate system

2.1.1 Nomoto 응답모델

Nomoto 응답모델은 받음각(β' , Drift angle)과 선회각속도(r')에 관한 2계 1차연립 미분방정식으로부터 유도된다. 식(1)은 Nomoto 응답모델로 타각(δ)에 관한 r 의 2계 비선형방정식의 형태를 하고 있다.

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (1)$$

K 는 선회성(Turning ability)지수, T_1, T_2 는 추종 및 안정성(Responsiveness & stability)지수, T_3 는 추종성지수라고 하며, T_1, T_2, T_3, K 를 통틀어 조종성지수(Manoeuving indices)라고 정의한다. 식(1) 우변의 $\dot{\delta}$ 항으로 인해 Nomoto 응답모델은 비선형방정식이 되기 때문에, 여기서는 식(2)의 Nomoto 1차계 근사식을 사용한다.

$$T' r' + r = K' \delta \quad (2)$$

2.1.2 Nomoto 응답모델의 수치해석

식(2)에서 선박조종운동 방정식은 1계 미분방정식의 형태를 취하고 있다. 일반적으로 미분방정식의 해는 해석적으로 쉽게 풀 수 없으므로 수치해석법을 이용하여 해를 구하게 된다. 미분방정식의 수치해를 구하는 방법에는 Euler 법, Heun 법, Runge-Kutta 법 등 일단계법과 Adams-Mouton 법과 같은 다단계법이 있다(Jin, 2009). Song et al.(1995)의 연구에서는 Euler 법을 이용하여 선박조종운동 방정식을 수치계산 하였으며, Son et al.(1998)의 연구에서는 축차근사적분법으로 수치계산 하였다. Euler 법은 높은 정밀도를 유지하기 위해서 시간간격을 매우 작게 해야 하나 계산량을 증가시키는 단점이 있다. 그러나 Runge-Kutta 법은 각 구간의 중간점의 기울기 정보를 추가로 이용함으로써 상대적으로 정밀도를 높일 수 있어 상미분방정식의 해법으로 널리 쓰이고 있으므로 본 연구에서는 4차 Runge-Kutta 법을 이용하였다.

Fig. 2는 Nomoto 1차계 근사식($K=0.1 \text{ sec}^{-1}$, $T=10 \text{ sec}$)에 $\delta=20^\circ$ 로 스텝조타 하였을 때 Euler 법(■)과 4차 Runge-Kutta 법(●)을 이용하여 1초 간격으로 수치계산한 결과를 해석적으로 구한 해(실선)와 비교한 것이다. Euler 법은 3초 이후 오차가 조금 있는 반면에 4차 Runge-Kutta 법은 해석적으로 구한 해와 거의 일치한다.

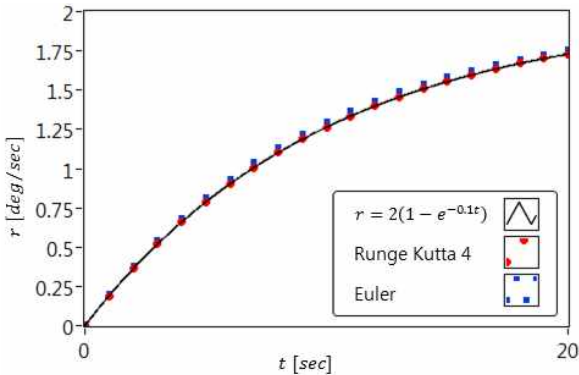


Fig. 2 Comparison of numerical analysis

2.1.3 Nomoto 응답모델에 따른 선박의 좌표 계산

시간에 따른 선박의 위치는 Fig. 3과 같이 타각(δ)에 따른 선박의 선회각속도(r), 선체고정 좌표계에서의 x 축방향 속도(u) 및 선박의 진침로(TC)를 이용하여 계산한다.

선박의 진침로인 TC_1 은 직전의 두 좌표 (X_0, Y_0) , (X_1, Y_1) 로부터 식(3)에 의해 구할 수 있다.

$$TC_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \right) \quad (3)$$

새로운 선박위치(X_2, Y_2)는 식(4)에 의해 나타낼 수 있다. 여기서, Δt 는 시간 간격으로 계산 편의를 위해 1초로 한다.

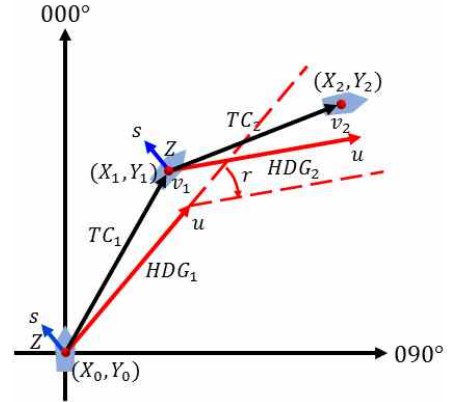


Fig. 3 Calculation of ship coordinates

$$\begin{aligned} X_2 &= u \Delta t \sin(TC_1 + r \Delta t) + X_1 \\ Y_2 &= u \Delta t \cos(TC_1 + r \Delta t) + Y_1 \end{aligned} \quad (4)$$

또한, 선박이 해조류의 영향을 받는 것으로 설정한 때에는, 외력 방위를 Z, 속력을 s, 선수방위를 HDG라고 하면 새로운 선박위치(X_2, Y_2)는 식(5)에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} X_2 &= u \Delta t \sin(HDG_1 + r \Delta t) + s \Delta t \sin(Z) + X_1 \\ Y_2 &= u \Delta t \cos(HDG_1 + r \Delta t) + s \Delta t \cos(Z) + Y_1 \end{aligned} \quad (5)$$

한편, 직전의 두 위치좌표로부터 진침로를 구할 때 주의해야 할 점은, 삼각함수(\tan^{-1})를 계산하는 좌표계와 방위를 나타내는 좌표계가 다르다는 점이다. 따라서 진침로(TC)를 계산하기 전에 Fig. 3의 좌표계를 삼각함수 계산을 위한 좌표계로 변환해야 한다. Fig. 4는 좌표계 변환 알고리즘을 나타낸 흐름도이다.

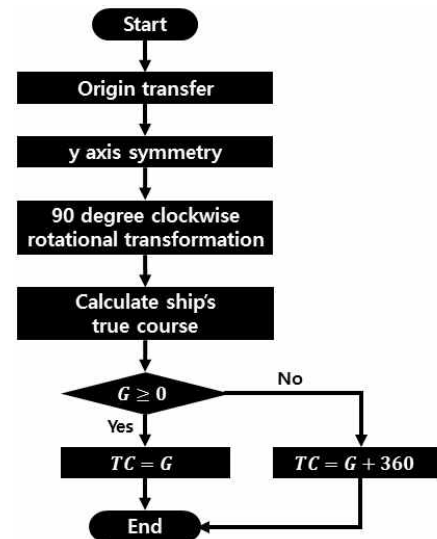


Fig. 4 Algorithm for coordinates conversion

이를 위해 먼저, 직전 위치(X_1, Y_1)와 현재 위치(X_2, Y_2)를 직전 위치만큼 이동시킨다. 이는 직전위치가 원점이 되도록 하여 현재위치가 원점에 대한 관계로 단순화되게 한다. 다음으로 이동시킨 위치를 y 축 대칭이동, -90° 회전이동하면 삼각함수를 계산하는 좌표계로 변환된다. 진침로 계산 시 계산되는 침로각의 범위가 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 이므로 0° 보다 작을 때에는 360° 를 더하여 선박의 진침로를 나타낸다.

지금까지의 결과를 기반으로, Nomoto 1차계 응답모델의 각상수에 $K=0.1 \text{ sec}^{-1}$, $T=10 \text{ sec}$, $\delta=20^\circ$ 을 적용하고, 선박의 속력(u)은 10 m/sec 로 일정하고, 선박의 초기좌표는 원점 $(0, 0)$ 이며 진침로(TC)의 초기값은 $000^\circ(N)$ 라고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. Fig. 5는 위 조건으로 스텝조타를 하였을 때 선박의 선회권(Turning circle)을 나타낸다.

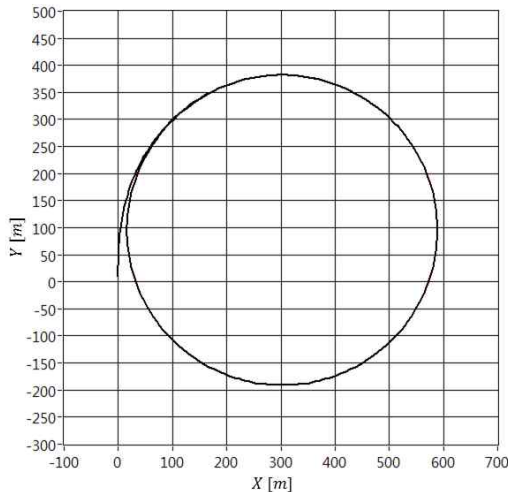


Fig. 5 Comparison of turning circle

이 그림에서 Nomoto 1차계 응답모델로부터 선회각속도(r)를 계산할 때 해석적($2(1-e^{-0.1t})$)으로 구한 것은 실선으로, 수치계산(RK4)으로 구한 것은 파선으로 나타내었다. 그 결과 두 선은 하나로 겹쳐 나타났으며, 이는 Fig. 2의 해석을 입증하는 것으로 볼 수 있다.

2.1.4 조타기 모델

상선에서 사용되는 조타기는 대부분 전동유압식이며, 수학 모델은 식(6)과 같이 표현된다(Shon, 1989).

$$\dot{\delta} = \begin{cases} (\delta^* - \delta)/T_E & ; |\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}| \\ \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| & ; |\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}| \end{cases} \quad (6)$$

여기서 δ^* 는 명령타각, T_E 는 조타기의 시정수, $\dot{\delta}_{\max}$ 는 최대 타각속도를 의미한다. $T_E |\dot{\delta}_{\max}|$ 는 펌프의 유량이 포화되는 $|\delta^* - \delta|$ 의 값을 나타낸다. 그리고 상단과 하단의 식은 각각 펌프의 유량이 정격 내인 경우와 포화상태인 경우에 적용한다.

2.2 RADAR 기능

선박조종 시뮬레이터에서 상대선박의 움직임을 본선에서 파악할 수 있는 RADAR 기능이 필수이다. 실제 선박에서는 스캐너를 통해 전파를 송수신하고, 반사되어 들어온 전파를 신호처리하여 상대선의 움직임을 화면상에 표시해준다. 그러나 본 시뮬레이터에서는 네트워크를 통해서 주고받은 본선과 상대선의 항행정보를 화면상에 보여주며, 또한 벡터계산을 통해 DCPA, TCPA 등의 기본적인 정보만을 계산한다.

2.2.1 Display mode

시뮬레이터에서 적용할 레이더의 화면표시기능은 본선의 위치를 레이더 화면의 정중앙에 고정하여 상대선을 나타낸다.

1) North-up mode

North-up mode는 북쪽(000°)이 레이더화면의 상단 정면을 향하도록 표시해주는 것으로, 식(7)과 같은 벡터계산을 통해서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{North} &= X_{other} - X_{own} \\ Y_{North} &= Y_{other} - Y_{own} \end{aligned} \quad (7)$$

2) Head-up mode

Head-up mode는 본선의 선수미선이 레이더화면의 상단 정면을 향하도록 표시해주는 것으로, 식(8)과 같이 North-up mode에서 구한 좌표를 $-HDG$ 만큼 회전 이동하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{Head} \\ Y_{Head} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-HDG) & \sin(-HDG) \\ -\sin(-HDG) & \cos(-HDG) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{North} \\ Y_{North} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig. 6은 8척의 상대선에 대하여 North-up mode와 Head-up mode를 시뮬레이션한 것으로, 이때 선박의 선수방향(Heading)은 345° 이다.

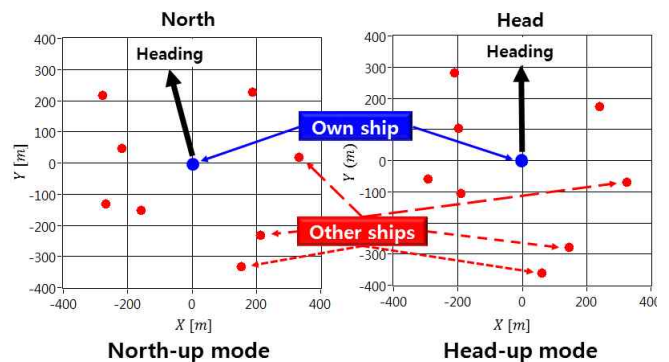


Fig. 6 Display mode

2.2.2 DCPA, TCPA 계산

DCPA(Distance of closest point of approach)는 본선과 상대선이 현재의 침로와 속력을 계속 유지하며 항해할 때 가장 가까워지는 거리를 의미하며, TCPA(Time of closest point of approach)는 DCPA까지 걸리는 시간을 의미한다. Fig. 7은 DCPA와 TCPA의 개념을 설명하는 것으로, 식(9)를 이용하여 DCPA와 TCPA를 구할 수 있다(Kim et al., 2008).

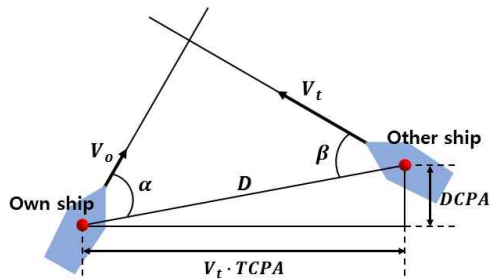


Fig. 7 DCPA and TCPA

$$DCPA = \frac{D |V_o \sin \alpha - V_t \sin \beta|}{\sqrt{V_o^2 + V_t^2 + 2V_o V_t \cos(\alpha + \beta)}} [m]$$

$$TCPA = \frac{D |V_o \cos \alpha + V_t \cos \beta|}{V_o^2 + V_t^2 + 2V_o V_t \cos(\alpha + \beta)} [sec] \quad (9)$$

2.3 데이터통신 프로토콜

본 연구에서 개발하고자 하는 시뮬레이터는 Single mode로 사용자 혼자서 시뮬레이션을 할 수 있을 뿐만 아니라 Fig. 8과 같이 둘 이상의 PC를 연결하는 스위칭허브(Switching hub)를 통해 Multi mode로 두 사람 이상 동시에 시뮬레이션 할 수 있다.

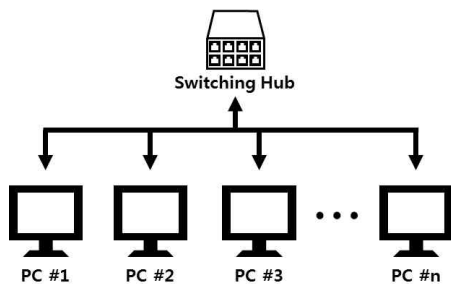


Fig. 8 Network of simulator

이것이 가능하기 위해서는 각각의 사용자는 상대방 선박에 대한 항해 정보를 파악할 수 있어야 하며, 이를 위해서 PC 상호간의 통신이 필수적이며, 반드시 시각 동기가 이루어져야 한다. Fig. 9는 본 네트워크 시뮬레이터 개발을 위해서 설계한 네트워크의 데이터통신 프로토콜을 나타낸다.

사용자는 시뮬레이터 프로그램상에서 서버(Server) 또는

클라이언트(Client)를 선택할 수 있으며, 두 PC는 TCP/IP 소켓 통신을 이용해 연결되어 두 선박간 거리, DCPA, TCPA의 계산을 위한 선박의 좌표, 속도, 진침로 등의 항해 정보를 서로 주고받는다. 또한, 해류 등 외부환경정보는 서버에서 설정하면 클라이언트로 전송되어 같은 외부환경조건을 공유할 수 있게 하였다.

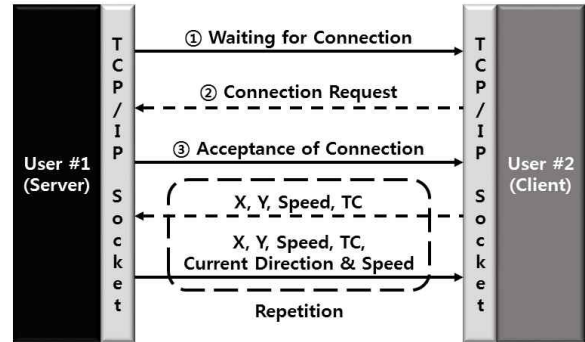


Fig. 9 TCP/IP data transfer protocol

3. 시뮬레이터 구현

선박조종운동 모델로 비선형 방정식을 사용하며, 3차원 그래픽 처리로 인해 빠른 수치계산이 필요한 FMSS는 CPU와 GPU의 높은 연산능력이 요구되어 서버급의 고성능 PC와 그래픽 카드가 필수적이다. 반면 본 연구에서는 누구나도 쉽게 선박조종 시뮬레이션을 할 수 있는 장치를 구현하고자 하였고, 이를 위해 범용 PC를 이용하였다. Fig. 10은 Nomoto 응답 모델의 수치계산, 조타기능, 레이더기능 및 데이터통신 등의 시뮬레이션 흐름도를 나타내고, Table 1은 본 연구를 위해서 사용한 PC의 최소 사양을 나타낸다.

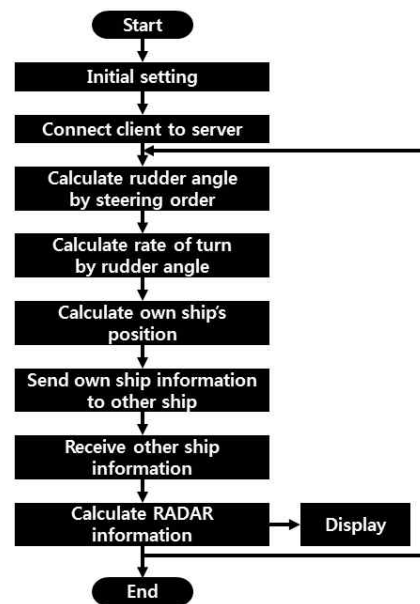


Fig. 10 Program execution flowchart

Table 1 Minimum specification of PC

CPU	Intel Core2 Quad @ 2.5GHz
RAM	DDR2 4GB
VGA	NVIDIA GeForce 9600GT(512MB)
Monitor	24" LCD (1920×1080)
Steering	Wheel Joystick or Keyboard
OS	Windows

시뮬레이터의 하드웨어는 Fig. 11과 같이 데스크탑 PC, 랩탑 PC, Wide LCD모니터, 네트워크 구성을 위한 스위칭허브, 조타기에 해당하는 Wheel Joystick, 키보드, 마우스 등으로 구성되었다. 소프트웨어는 그래픽컬 프로그래밍환경을 제공하는 NI사의 LabVIEW 2016을 이용하였다. 선박조종에서 가장 중요한 조타기는 Wheel Joystick 또는 키보드의 좌우 방향키를 이용하여 조종할 수 있도록 하였다.

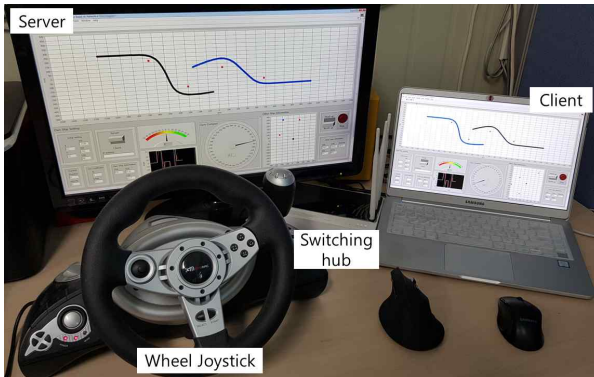


Fig. 11 Simulator hardware configuration

Fig. 12와 13은 서버와 클라이언트에서 두 사람이 시뮬레이션하는 화면을 나타낸 것이다. 시뮬레이터 화면 상단의 검은색 점은 본선, 파란색 점은 상대선, 그리고 붉은색 점은 장애물을 나타내며, 화면 구성은 다음과 같다. ㉑는 선박, 장애물 등의 궤적을 표시하는 전체적인 화면, ㉒는 조종성지수, 시작 위치 및 초기침로 입력창, ㉓는 서버와 클라이언트 설정 버튼, ㉔는 조류, 조타기 파라미터, 선속 입력창 및 실시간으로 변하는 선박의 침로 표시창, ㉕는 타각을 제어할 수 있는 조타기 및 타각표시기, ㉖는 선수방향(Heading) 표시기, ㉗는 레이더 화면 및 Head-up/North-up mode 전환 버튼, ㉘는 상대선의 침로, 속력, 상대선과의 거리, DCPA 및 TCPA 표시창을 나타낸다.

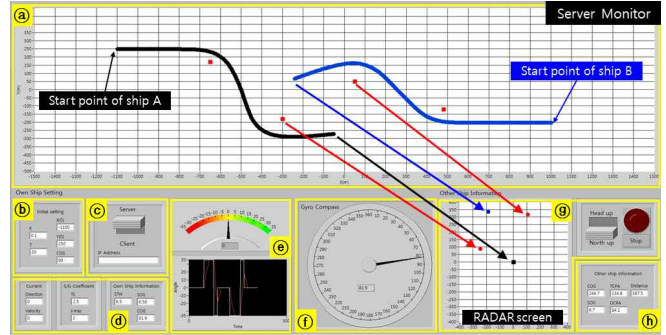


Fig. 12 Screen capture of simulator(Server)

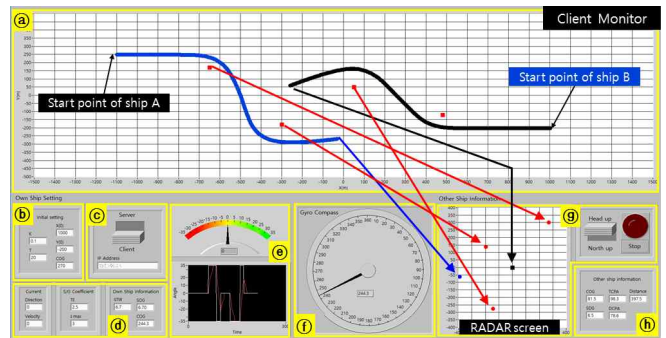


Fig. 13 Screen capture of simulator(Client)

4. 시뮬레이터 검증

시뮬레이터가 제대로 설계되었는지 확인하기 위해서는 현재 운항하고 있는 선박의 K, T 값을 시뮬레이터에 적용하였을 때 시뮬레이션 결과와 실제 선박의 시험결과의 오차가 작아야 하며, 최소 기준인 IMO의 선박조종성기준을 만족해야 한다. 이에 따라 Jung et al.(2008)이 한국해양대학교 실습선 한바다호의 선회시험결과를 통해 계산한 조종성지수(K, T)값을 시뮬레이터에 적용하여 초기선회성능시험, 정상선회성능시험, Zig-zag 시험, 신침로거리시험을 시행하였으며, 그 결과를 실선시험결과와 비교·분석하였다. 또한, 추가로 외부환경영향 시험을 실시하였다.

Table 2는 한바다호 실선시험에서의 K, T 값을 나타낸다. 이처럼 타각 크기에 따라 K, T 값이 변하며, 이들 값 중에서 실선시험 결과값과 시뮬레이션 값이 가장 근접한 Port 10°에서의 값($K=0.1 \text{ sec}^{-1}, T=20 \text{ sec}$)을 적용하였다.

Table 2 Manoeuvring indices of T.S. HANBADA

	Speed [kn]	K	T	Rudder angle
T.S. HANBADA	13.0	0.10	20.0	10°
	13.0	0.06	17.0	20°
	13.0	0.05	13.0	35°

* Source : A Study on the Ship's Performance of T.S. HANBADA(III)(Jung et al., 2008)

Table 3은 한바다호의 주요제원을 나타낸다.

Table 3 General particulars of T.S. HANBADA

Item	Dimension
Length Overall(LOA)	117.20 m
Length Between Perpendicular(LBP)	104.00 m
Breadth(B)	17.80 m
Mean Draft(Full Loaded Condition)	5.915 m
Maximum Speed	19.0 kn
Main Engine MCR(100%)	8,130 BHP × 176 RPM
Gross Tonnage	6,686 ton
Displacement(Full Loaded Condition)	6,435 ton
Block Coefficient(Cb)	0.5749 at 5.915 m
GM(Full Loaded Condition)	2.360 m

4.1 조타기성능시험

시뮬레이터의 조종성능을 시험하기 전에 먼저 조타기 성능을 시험하였다. 조타기성능은 국제해상인명안전협약(SOLAS)에 의해 정해지는데, 타각 35°에서 -30°까지 28초 이내에 타각이 움직이도록 정하고 있다(SOLAS, 2014).

한바다호의 조타기 파라미터($T_E, |\dot{\delta}_{max}|$)를 알 수 없어, 식 (6)의 조타기 모델에 실선에서 많이 사용되고 있는 수치인 $T_E = 2.5 \text{ sec}$, $|\dot{\delta}_{max}| = 3.0 \text{ deg/sec}$ (Lee et al., 1998; Yeo and Rhee, 2005)를 적용하여 시험하였으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타낸다.

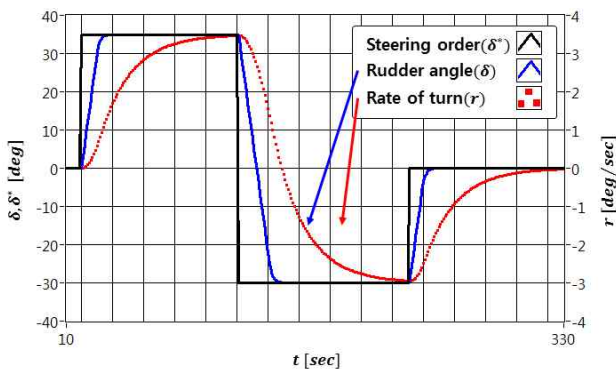


Fig. 14 Steering gear test

Jung et al.(2008)에 의하면 한바다호의 경우, 0°에서 33°까지 타각이 움직이는데 12초가 소요된 반면, 시뮬레이션에서는 14초가 걸려 한바다호와 2초의 차이가 발생하였다. 35°에서 -30°까지는 25초가 소요되어 국제해상인명안전협약 규정을 만족하였다. Table 4에 시뮬레이터와 한바다호의 조타기성능 시험결과를 비교하여 나타낸다.

Table 4 Time to follow rudder angle due to steering order

Steering order	Time to follow rudder angle [sec]	
	Simulator	T.S. HANBADA
0° → 33°	14	12
35° → -30°	25	Nil
-30° → 0°	13	

4.2 초기선회성능시험

초기선회성능시험은 타를 돌린 시점부터 선수각이 해당 타각에 도달할 때까지 거리(Path length)를 측정하며, IMO 조종성 기준에서는 10° 타각을 주었을 때 선박이 실제로 항주한 거리가 선박길이의 2.5배 미만으로 규정되어 있다. 시뮬레이터의 초기선회성능시험은 Jung et al.(2008)의 연구와 같이 10° 뿐만 아니라 5°, 20°, 35°에 대해 시행하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타낸다.

Table 5 Comparison of initial turning time

(H: HANBADA, S: Simulator, Test speed: 13kn)

Rudder angle	Initial turning time [sec]	Path length [m]
5°	H : 26, S : 27	H : 174(1.67L), S : 181(1.74L)
10°	H : 28, S : 28	H : 187(1.80L), S : 187(1.80L)
20°	H : 34, S : 29	H : 227(2.18L), S : 194(1.87L)
35°	H : 36, S : 31	H : 240(2.30L), S : 207(1.99L)

Table 5에서 타각이 5°, 10° 일 때는 한바다호 실선시험과 시뮬레이션 결과가 거의 일치하였으나, 타각이 20°, 35° 일 때는 초기선회시간에서 5초, 항적에서 33m 차이가 발생하였다. 이는 실선 선회시험에서는 선회를 함에 따라 선속이 감소하고 그에 따라 선회성지수(K)가 작아지며 그만큼 항적이 커지게 되나, 시뮬레이터는 선회시험 동안 선속의 변화가 없이 일정하여 선회성지수가 감소하지 않기 때문이다. 그러나 한바다호와 시뮬레이터 모두 IMO에서 정한 초기선회성능 규정인 2.5L 미만을 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 정상선회성능시험

정상선회성능시험은 좌·우현의 전타각 35°를 발령하여 선수방위가 360° 변할 때까지 시험하여 측정한 종거(Advance)와 선회반경(Tactical diameter)으로 선박의 조종운동특성을 평가한다. 우회두 고정피치 프로펠러를 사용하는 일반 상선에서는 우현으로 선회한 경우가 좌현으로 선회한 경우보다 선회권이 크게 나타난다. 그 이유는 우회두 프로펠러의 회전으로 인한 횡압력 때문으로 알려져 있다. 그러나 본 시뮬레이터는 수학적인 모델에 의해서 계산되므로 우현과 좌현 모두 똑같은 선회권을 그리게 된다. Fig. 15는 좌현과 우현으로 각각 10°, 20°, 35° 타각을 주어 시험하였을 때 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

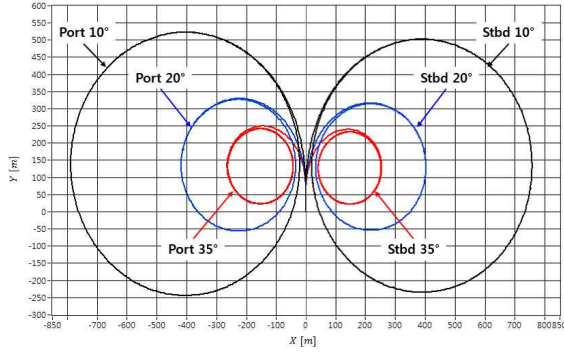


Fig. 15 Turning circle test

Table 6은 정상선회성능시험과 관련하여 IMO 표준, 한바다호, 시뮬레이터의 시험결과를 정리한 것으로 증거는 시뮬레이션과 한바다호 실선시험이 거의 같게 나왔다. 그러나 시뮬레이터의 선회반경은 실선시험 결과보다 0.6~1.1L 정도 작게 나왔다. 이는 초기선회성능시험에서와 같이 선회시험 동안 선속의 변화가 없이 일정하여 선회성지수가 감소하지 않기 때문이다. 그러나 정상선회성능시험도 IMO 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 6 Comparison of turning circle
(Test speed: Stb'd 12.3 kn, Port 13.0 kn)

Item		IMO Standards	T.S. HANBADA	Simulator
Stb'd 35°	Advance	4.5 L	2.9 L(302 m)	2.3 L(236 m)
	Tactical diameter	5.0 L	3.5 L(368 m)	2.4 L(250 m)
Port 35°	Advance	4.5 L	2.8 L(294 m)	2.4 L(250 m)
	Tactical diameter	5.0 L	3.1 L(325 m)	2.5 L(265 m)

4.4 Zig-zag 시험

Zig-zag 시험은 선박의 변침성능을 알기 위한 척도로 Overshoot angle이 클수록 변침성능은 떨어진다고(Yang, 2002). 시험방법에는 10°/10° Zig-zag 시험과 20°/20° Zig-zag 시험이 있으며, Fig. 16과 Fig. 17에 각각의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

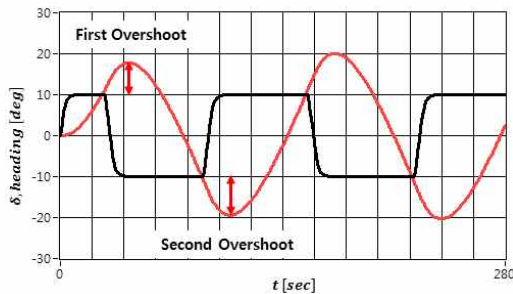


Fig. 16 10°/10° Zig-zag test

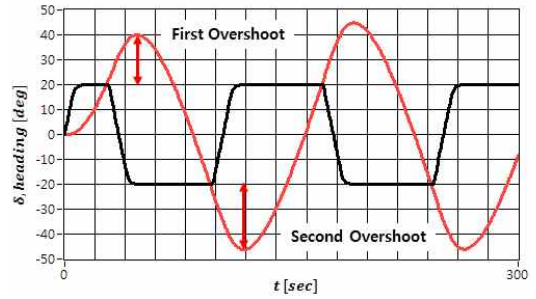


Fig. 17 20°/20° Zig-zag test

Table 7은 Zig-zag 시험과 관련하여 IMO 표준, 한바다호, 시뮬레이터의 시험결과를 정리한 것으로, 시뮬레이터의 Overshoot angle은 10°/10° Zig-zag 시험에서 한바다호 실선 시험결과보다 1.2~2.6° 작은 것으로 나타났으며 20°/20° Zig-zag 시험에서는 2.3° 큰 것으로 나타났다. 그러나 IMO에서 정한 Zig-zag 시험기준을 모두 충족하는 것으로 나타났다.

Table 7 Zig-zag test

Item		IMO Standards	T.S. HANBADA	Simulator
10°/10°	First overshoot	10.0°	9.0°	7.8°
	Second overshoot	25.0°	12.0°	9.4°
20°/20°	First overshoot	25.0°	17.6°	19.9°

4.5 신침로거리시험

신침로거리란 Fig. 18과 같이 선박이 어떤 침로로 항주중 신침로로 변침할 때 전타(Hard over)하여 신침로에 정착하기까지의 전진거리로, 원침로의 전타위치에서 신·구침로의 교차점까지의 전진거리를 의미한다(Jung et al., 2008).

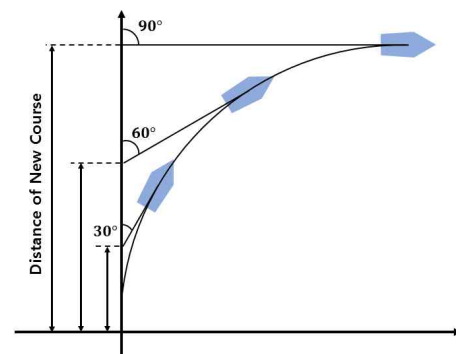


Fig. 18 Distance of new course(Starboard)

신침로거리는 IMO에서 정한 선박조종성 표준척도는 아니지만 한바다호와의 비교 검증을 위해서 신침로가 30°, 60°, 90°인 경우에 대해서 시험하였고, Table 8에 정리하였다.

Table 8 Distance of new course(starboard)
(H: HANBADA, S: Simulator, Test speed: 13 kn)

Rudder angle	New course		
	30°	60°	90°
10°	H : 210 m S : 212 m	H : 340 m S : 349 m	H : 525 m S : 523 m
20°	H : 200 m S : 151 m	H : 300 m S : 232 m	H : 425 m S : 330 m
35°	H : 125 m S : 128 m	H : 205 m S : 185 m	H : 300 m S : 249 m

한바다호 시험과 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 타각 35°에 신침로 90°에서 51m 차이가 있었고, 타각 20°에서는 3개 신침로 모두에서 49~95m 차이가 나타났으나, 이를 제외하고는 최대 10% 이내의 상대오차가 발생하였다. 타각 20°에서 특히 큰 차이가 발생하는 것은 선회로 인해 생기는 선체저항이 20°에서의 선체운동에 더 큰 영향을 미치기 때문일 것으로 여겨진다.

4.6 해류의 영향

실제 해상선박은 해조류, 바람, 풍랑 등 외부환경의 영향을 받으면서 항해를 하게 된다. 따라서 외부환경요소를 감안하여 선박조종실습을 할 수 있도록 시뮬레이터를 설계하였으며, 본 연구에서는 외부환경요소 중 해류만을 고려하였다. Fig. 19는 13kn로 우현 35°로 정상선회성능시험 중 NE방향으로 1.5kn의 해류가 흘러갈 때를 가정하여 시뮬레이션 한 결과로 선박이 회전하면서 NE방향으로 이동하는 것을 나타낸다.

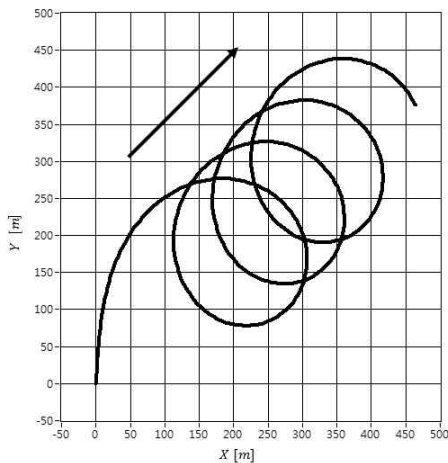


Fig. 19 Effect of sea current

5. 결 론

기존 Full Mission 선박조종 시뮬레이터의 접근용이성 저하와 PC기반 시뮬레이터의 멀티유저 동시실습 기능 미구현이라는 문제점을 해결하고자 TCP/IP통신을 이용한 네트워크기반

의 선박조종 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터의 선박조종운동 모델로 Nomoto 1차계 근사식을 적용하였고, 수치해석을 위해 4차 Runge-Kutta 법을 이용하였다. 이를 통해 선박의 위치를 계산하였으며 선회권을 그려봄으로써 모델의 유용성을 검증하였다. RADAR 기능은 두 가지의 화면표시모드를 통해 구현하였고, DCPA와 TCPA를 계산하여 선박의 충돌위험을 판단할 수 있게 하였다. 또한, TCP/IP 통신을 이용한 데이터통신 프로토콜을 설계하여 스위칭허브를 통해 서로 다른 사람과 선박조종 시뮬레이션을 할 수 있도록 하였다.

시뮬레이터를 검증하기 위해 한바다호 조종성능시험과 비교한 결과, Zig-zag 시험과 정상선회성능시험에서는 최대 32%의 상대오차가 발생하였으며, 초기선회성능시험과 신침로거리시험에서는 타각 10°에서 3% 이내의 상대오차가 발생하여 두 시험결과가 매우 근접하였으나 타각 20°와 30°에서는 최대 22%의 상대오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실선시험의 경우 선회 시 선체저항의 증가로 속력이 감소함에 따라 선회성지수가 변하였으나, 시뮬레이터는 조타 시 선속과 선회성지수가 일정하기 때문으로 여겨진다. 타각 변화에 따라 선회성지수 값이 가변하는 방법을 도입한다면 시뮬레이터의 정확도를 높일 수 있다. 또한, 시뮬레이터는 스위칭허브의 포트 수만큼 확장가능하기 때문에 이론적으로 1:n 시뮬레이션도 구현 할 수 있다.

끝으로 본 시뮬레이터는 IMO 선박조종성기준을 모두 만족하고, 네트워크를 이용해 두 명의 사용자가 동시에 시뮬레이션을 할 수 있으므로 국제해상충돌방지규칙에서 중요하게 다루는 Head-on, Crossing, Overtaking 등 다양한 상황을 연습해 볼 수 있어 일반인이나 항해사 교육을 받는 학생들이 선박항해술을 익히는데 유용할 것이라 여겨진다.

References

- [1] Im(2003), "Automatic Control for Ship Collision Avoidance Support System", Journal of Korean Navigation and Port Research, 27(4), pp. 375-381.
- [2] IMO(1993), Interim Standards for Ship Manoeuvrability, Resolution A.751(18).
- [3] Jin, G. G.(2009), Numerical Analysis and C Implementation.
- [4] Jung, C. H., Lee, H. K. and Kong, G. Y.(2008), "A Study on the Ship's Performance of T.S. HANBADA(III)", Journal of Navigation and Port Research, 32(6), pp. 439-445.
- [5] Kim, J. H., Lee, S. K., Lee, S. E. and Bae, C. H.(2008), "A Study of the Depth Control System and the Collision Avoidance System for the Manta-type UUV ", Journal of Navigation and Port Research, 32(6), pp. 447-452.
- [6] Korean Register(2009), KR Technical Rules.
- [7] Lee, B. K., Jeong, K. Y. and Kim, J. H.(1998), "A Study

- on the Automatic Route Tracking Control of Ships”,
Journal of Korea Society of Marine Engineering, 22(6),
pp. 920-927.
- [8] Nomoto, K., Taguchi, K., Honda, K. and Hirono, S.
(1957), “On the Steering Qualities of Ships”, ISP, Vol. 4.
- [9] Shon, K. H.(1998), “On the Mathematical Model for
Estimating Manoeuvring Performance of Ships”, Journal
of Korean Institute of Navigation, 13(2), pp. 57-73.
- [10] SOLAS(2014), Chapter II-1 / Reg.29 Steering gear,
International Convention for the Safety of Life at Sea.
- [11] Son, K. H. and Lee, S. W.(1998), “A Study on Development
of PC-based Ship-handling Simulator”, Journal of the
Korean Society of Marine Environment & Safety, 4(2), pp.
25-33.
- [12] Song, C. U. and Kim, W. S.(1995), “A Study on ARPA
Radar Simulator using PC”, Journal of the Korean
Society of Marine Environment & Safety, 1(1), pp. 63-82.
- [13] STCW 95(1995), Section A-I/12, Standards governing
the use of simulators, IMO.
- [14] Yang, S. R.(2002), “A Simulator Study on Validation of
IMO’s Ship Manoeuvrability Standards with Particular
Reference to Yaw-Checking and Course-Keeping
Ability”, Master’s Thesis.
- [15] Yang, W. J., Jun, S. H. and Park, G. K.(1999), “Development
of GPS Simulation Tool Kit for Personal Computer”, Journal
of Navigation and Port Research, 24(4), pp. 219-226.
- [16] Yeo, D. J. and Rhee, K. P.(2005), “A Study on the
Sensitivity Analysis of Submersibles’ Manoeuvrability”,
Journal of the Society of Naval Architects of Korea,
42(5), pp. 458-465.

Received 26 August 2019

Revised 2 October 2019

Accepted 24 December 2019