

자율운항기술 기반의 선박 통항 안전성 평가 방법론 개선 연구

박준모*†

* 목포해양대학교 항해학부 교수

Study on Improving the Navigational Safety Evaluation Methodology based on Autonomous Operation Technology

Jun-Mo Park*†

* Professor, Division of Navigation Science, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 곧 다가올 미래에는 자율운항선박, 육상 원격제어센터에서 제어되는 선박, 그리고 항해사가 탑승하여 운항하는 선박이 함께 공존하며 해상을 운항할 것이며, 이러한 상황이 도래했을 때 해상 교통 환경의 안전을 평가할 수 있는 방법이 필요할 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 자율운항기술을 사용하여 항해사가 직접 조종하는 선박과 자율운항선박이 공존하는 해상환경 하에서 선박 조종시뮬레이션을 통해 통항 안전성을 평가하기 위한 방안을 제시하였다. 자선은 6-자유도 운동 기반의 MMG 모델을 심층 강화학습 기법 중 하나인 PPO 알고리즘으로 학습하여 자율운항 기능을 갖출 수 있도록 설계하였다. 타선은 평가 대상 해역의 해상 교통 모델링 자료로부터 선박이 생성되도록 하였고, 기 학습된 선박모델을 기반으로 자율운항 기능을 구현되도록 하였다. 그리고 해양기상 자료 데이터베이스로부터 조위, 파랑, 조류, 바람에 대한 자료를 수집하여 수치 모델을 수립하고 이를 기반으로 해양기상 모델을 생성하여 시뮬레이터 상에서 해양 기상이 재현되도록 설계하였다. 마지막으로 안전성 평가는 기존의 평가 방법을 그대로 유지하되, 선박조종시뮬레이션에서 해상교통류 시뮬레이션을 통한 충돌 위험성 평가가 가능하도록 하는 시스템을 제안하였다.

핵심용어 : 자율운항기술, 안전성 평가, 해상 교통 모델링, 선박조종시뮬레이션, 강화학습

Abstract : In the near future, autonomous ships, ships controlled by shore remote control centers, and ships operated by navigators will coexist and operate the sea together. In the advent of this situation, a method is required to evaluate the safety of the maritime traffic environment. Therefore, in this study, a plan to evaluate the safety of navigation through ship control simulation was proposed in a maritime environment, where ships directly controlled by navigators and autonomous ships coexisted, using autonomous operation technology. Own ship was designed to have autonomous operational functions by learning the MMG model based on the six-DOF motion with the PPO algorithm, an in-depth reinforcement learning technique. The target ship constructed maritime traffic modeling data based on the maritime traffic data of the sea area to be evaluated and designed autonomous operational functions to be implemented in a simulation space. A numerical model was established by collecting data on tide, wave, current, and wind from the maritime meteorological database. A maritime meteorology model was created based on this and designed to reproduce maritime meteorology on the simulator. Finally, the safety evaluation proposed a system that enabled the risk of collision through vessel traffic flow simulation in ship control simulation while maintaining the existing evaluation method.

Key Words : Autonomous operation technology, Safety evaluation, Maritime traffic modeling, Ship handling simulation, Reinforcement learning

1. 서 론

최근 선박의 운항 자동화 방안 마련, 통항 선박의 안전성 확보, 그리고 항만 입출항 선박의 관제 시스템 수립 등의 분야에서 자율운항선박을 빼놓고 설명할 수 없다.

IMO(국제해사기구)에서는 자율운항선박(Maritime Autonomous Surface Ship, 이하 MASS)을 ‘수면 상에서 사람의 개입 없이 또는 최소한의 개입으로 운항하는 선박’으로 정의하였으며, MASS의 자율 수준에 따라서 부분 자율운항 선박과 완전 자율운항선박으로 분류하고 있다. 이러한 선박은 고도의 자율도를 가지고, 계획된 항로를 운항하면서 장애물이나 타 선박과의 충돌 위험이 있는 경우 이를 감지하고 회피하는 기능을

† jmpark@mmu.ac.kr, 061-240-7180

갖추고 있다. 다만, 현재 개발 중인 MASS는 대부분 완전 자율운항선박이 아닌 부분 자율운항 선박으로 최소한의 승무원이 탑승하여 선박을 운항하거나 감시하며, 필요시 육상 원격 제어센터에서 선박을 운항할 수도 있다(Gong et al., 2022). 즉, 머지않은 미래에는 MASS, 육상 원격제어센터에서 제어되는 선박, 그리고 항해사가 탑승하여 운항하는 선박이 함께 공존하며 해상을 운항할 것이며, 이러한 상황이 도래했을 때 해상교통환경의 안전을 평가할 수 있는 방법이 필요할 것으로 사료된다.

선박의 통항 안전성 평가는 해상교통안전진단 시행지침에 의거하여 해상교통환경 측정, 해상교통시스템 적정성 평가, 그리고 해상교통안전대책을 수립하고 있다(MOF, 2022). 이 중, 선박조종시뮬레이션을 이용한 해상 교통 안전성 분석은 가상 환경에서 여러 가지 위험 상황을 고려하여 항해사가 직접 선박을 운항해 봄으로써 안전성을 평가할 수 있기 때문에 통항안전성 평가에서 가장 핵심적인 항목이라고 할 수 있다. 그러나 현재 통항 안전성 평가에 사용하고 있는 선박조종시뮬레이션 방법은 한계점을 가지고 있다.

첫째, 항해사가 운항하는 가상 선박(Own Ship, 이하 ‘자선’)과 달리 평가 해역 주변을 통항하는 선박(Target Ship, 이하 ‘타선’)은 사전에 설정된 경로를 따라 기계적으로 움직이도록 설정하여 시뮬레이션하므로 사실성이 떨어진다는 점이다. 또한 자선을 조종하는 항해사가 타선의 설정 경로를 미리 알고 시뮬레이션을 할 수 있어 자선과 타선과의 충돌 위험을 고려한 시뮬레이션이 이루어지지 않는 문제점이다. 둘째, MASS와 항해사 운항 선박이 공존하는 운항 환경에서의 통항 안전성 평가가 불가하다는 점이다. 현재의 선박조종시뮬레이터는 자선을 자율운항선박 모드로 설정하여 안전성 평가를 할 수 없으며, 타선 또한 통항 수역의 상황을 인지하고 스스로 피항할 수 있는 기능을 갖추고 있지 않다.

선박조종시뮬레이션에서 MASS의 통항 안전성 평가와 관련된 선행연구를 살펴보면, 강화학습 방법을 이용해서 선박 항해 에이전트를 학습시키기 위한 방안을 제시한 연구(Park et al., 2019), 피항판단평가함수를 적용한 선박교통흐름 통합 프로그램 구축에 대한 연구(Seong, 2010), 그리고 해상교통흐름에 대한 시뮬레이션 구축을 위해 에이전트 기술 연구(Kim, 2019) 등이 수행되었다.

이 연구들은 해상교통시뮬레이션이 아닌 해상교통흐름의 안전성을 평가하기 위한 교통류 시뮬레이션 개선에 대한 것이다. 즉, 선박조종시뮬레이션에서 MASS의 출현에 따른 통항 안전성 평가 방법을 제안한 연구는 부족한 상황임으로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 항해사가 직접 조종하는 선박과 레벨 4 수준의 MASS가 공존하는 해상환경 하에서 선박조종시뮬레이션을 통해 통항 안전성을 평가하기 위한 방법에 관한 연구

를 다룬다.

이를 위해 현재의 선박조종시뮬레이션을 이용한 통항 안전성 평가 기법을 살펴보고 개선 필요성을 조사하였다. 그리고 선박조종시뮬레이터 시스템 내에 자율적으로 운항하는 자선 또는 타선을 적용할 수 있는 시스템을 설계하고, 시스템 구성에 필요한 각 모듈의 개념 및 구성을 설명하였다.

2. 시뮬레이션을 활용한 통항 안전성 평가 방법

우리나라는 수역의 설정 및 변경, 수역 내 시설물의 건설 및 보수, 그리고 항만(부두)을 개발하려는 해사안전법 제15조(해상교통안전진단)에 따라 안전진단기준에 따른 해상교통안전진단을 실시하도록 하고 있다(MOF, 2022). 그리고 해상교통안전진단 시행지침(해양수산부 고시)에서는 안전진단 대상 사업별 안전진단 항목과 안전진단 항목별 기술기준을 제시하고 있다(MOF, 2022).

통항 안전성 평가에 대한 기술기준은 통항 환경 설정, 실시 횟수, 그리고 평가 기법으로 나뉜다.

통항 환경 설정은 기본적으로 선박조종시뮬레이션을 이용하며, 선박 운항자가 직접 조종하여 단독 통항하거나 선박 운항자 2명이 양방 통항하도록 하여 평가한다. 그리고 표준 조선법으로는 현지 교통조사 결과 및 해역이용자 의견을 반영하여 작성하되, 구체적인 통항 예상 항로, 변침점, 선속, 예선 지원시점 등 실제 조선 환경과 유사하게 수립하여 표준조선법에 따른 시뮬레이션을 수행하도록 하고 있다.

시뮬레이션 실시 횟수는 주야간 동일 비율을 적용하여 입출항 최소 각각 3회 이상으로 해야 하며, 해상 사업의 수역 시설이 항만 및 어항설계 기준을 만족하지 못하는 경우 입출항 최소 각각 3회 이상을 실시하도록 하고 있다.

시뮬레이션을 이용한 통항 안전성 평가는 장애물과의 최근접 통항 거리를 기초로 평가하는 근접도 평가, 선박의 타각, 엔진 사용량 등을 기반으로 평가하는 제어도 평가, 그리고 선박조종시뮬레이션에 참여한 선박운항자가 느끼는 심리적 부담 또는 위험도를 주관적으로 평가한 운항자 주관적 평가로 이루어져 있다.

우리나라의 통항 안전성 평가 방법을 살펴보면 선박조종시뮬레이션을 이용해서 항해사가 직접 선박을 조종하면서 평가하도록 하고 있고, 시뮬레이션 실시 횟수도 3회 또는 5회로 적은 수행 횟수로 안전성을 평가하고 있음을 알 수 있다. 또한 안전성 평가 시에는 근접도와 제어도 평가도 사용하지만 선박 운항자의 주관적 평가가 종합 평가 시 가장 중요한 핵심 항목으로 고려하고 있다.

우리나라 법 규정에서 제시한 선박 통항 안전성 평가 기준의 문제점은 선박 운항자가 직접 시뮬레이션에 참여하여 선박을 조종해야만 하고, 선박 운항자의 주관적 평가가 가

장 중요하기 때문에 항해사의 경력, 선박 조종 능력, 그리고 개인적 특성 등에 따라서 평가 결과가 좌우될 수 있다는 한계가 있다는 점이다.

또한 선박조종시뮬레이션 수행 횟수가 적다는 점이다. 평가 대상 해역은 통항하는 선박의 종류, 통항 시간대, 그리고 기상 환경이 수시로 변화한다. 따라서 이러한 상황을 종합적으로 고려한 통항 안전성 평가를 위해서는 평가 기준에서 제시한 5회 이상보다 더 많은 시뮬레이션 횟수가 요구될 것으로 판단된다. 그러나 선박 운항자가 많은 횟수의 시뮬레이션을 수행하기에는 비용과 시간 등의 문제가 발생할 수 있다.

그리고 평가하고자 하는 선박 주변을 통항하는 선박을 어떻게 발생시킬 것인지에 대한 문제이다. 해상교통안전진단 기술기준에는 해당 사항에 대한 언급은 없으나, 실무에서는 실 해역의 특성을 반영하기 위해 해상교통조사를 통해 평가 해역을 통항하는 선박의 종류와 척수 등을 조사하고, 시뮬레이션 수행 시 이를 타선으로 입력하여 수행하고 있다. 다만, 현재 선박조종시뮬레이터는 타선을 사람이 직접 조종하지 않고, 미리 설정된 경로를 따라 기계적으로 움직이도록 입력하기 때문에 사실성이 떨어진다는 문제가 있다. 또한 설정된 타선의 항로를 시뮬레이션 참여자가 알고 있다면 타선과의 위험 상황 조우를 사전에 회피할 수 있어 통항 안전성 평가의 취지가 흐려진다고 할 수 있다.

마지막으로 MASS 출현에 따른 통항 안전성 평가 문제이다. 현재 선박조종시뮬레이션을 활용하여 MASS의 통항 안전성을 평가할 수 있는 시스템이나 법적 기준이 없는 실정이며, MASS와 항해사가 직접 조종하는 선박이 공존하는 상황에서의 통항 안전성 평가 방법 또한 마찬가지이다.

따라서 본 연구에서는 MASS가 출현하였을 때의 통항 안전성 평가를 위한 방안과 더불어 자율운항기술을 활용하여 다양한 상황을 종합적으로 고려하고 시뮬레이션을 많은 횟수로 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 수역을 통항하는 타선을 사실감 있게 발생시키고 이동시킬 수 있는 방안도 제시하였다.

3. 자율운항기술 기반 선박조종시뮬레이션 통합 시스템 설계

3.1 시스템 요약

Fig. 1은 본 연구에서 설계한 시스템으로 선박조종시뮬레이션 수행에 있어 자선을 항해사가 직접 조종하는 모듈과 자율운항선박 모듈로 나누어 설계하였다.

선박조종시뮬레이션을 수행하기 위해서는 기본적으로 평가 대상해역을 통항하는 선박의 해상교통현황 자료에서 도출된 타선 설정과 기상 환경 자료의 입력이 요구된다.

따라서 해상교통현황 자료를 선박조종시뮬레이션 환경에 적용하기 위해 외부의 데이터베이스에서 자료를 수집하고 이를 내부 모듈에 저장하며, 이를 타선 교통흐름 재현 모듈(Virtual target ship traffic reproduction module)에서 통항 선박의 종류, 통항 시간대, 통항 빈도, 통항 항로대 등이 포함된 해상교통 모델링 데이터(Traffic modeling data)를 만든다. 그리고 해상 기상 또한 해상 교통과 마찬가지로 외부 데이터베이스에서 자료를 수집하고 이를 내부 모듈에 저장하며, 이를 해양 기상 재현 모듈(Virtual marine meteorology reproduction module)에서 유향, 유속, 시정, 풍향, 풍속 등이 포함된 해양 기상 모델링 데이터(Meteorological modeling data)를 만든다. 이렇게 만들어진 해상교통 모델링 데이터와 해양 기상 모델링 데이터는 시뮬레이션을 수행할 때 자동으로 환경에 반영 되도록 설계하였다.

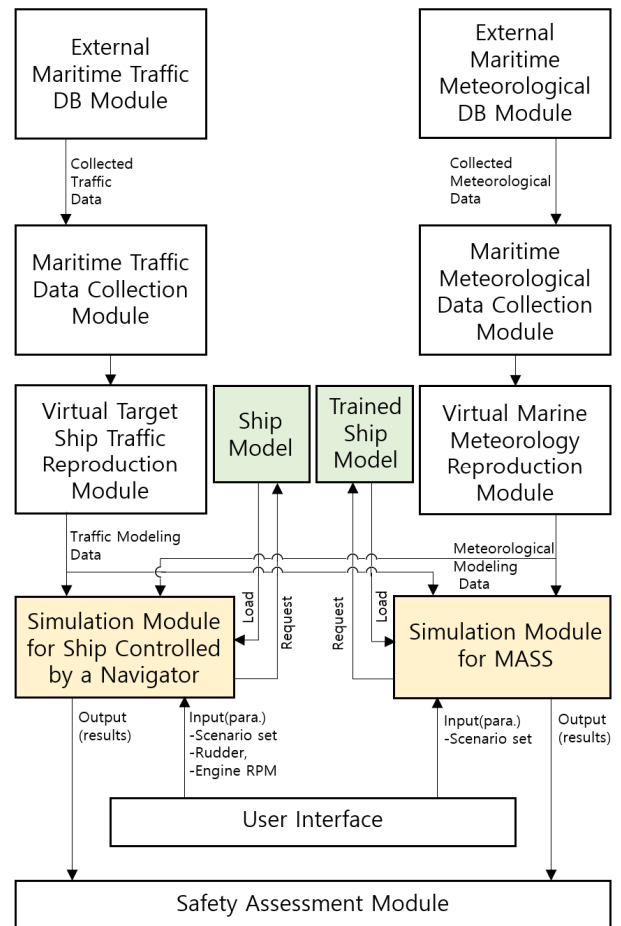


Fig. 1. Design of integrated ship control simulation system.

항해사가 직접 선박을 조종하는 시뮬레이션(Simulation module for ship controlled by a navigator) 모듈은 User Interface를 통해 시나리오 및 타각, 엔진 RPM을 입력받고 이를 선박 모

델(Ship model)에 실시간으로 반영하여 선박이 가상환경에서 움직이도록 설계하였다. 그리고 자율운항선박 시뮬레이션 (Simulation module for MASS) 모듈은 User Interface를 통해 시나리오만을 입력받고 학습된 선박 모델(Trained ship model)에 의해 선박이 가상 환경에서 자율적 판단에 의해 움직이도록 설계하였다. 마지막 단계로서 시뮬레이션 모듈에서 출력된 결과를 안전성 평가 모듈(Safety Assessment Module)에 입력하여 선박의 통항 안전성 평가를 실시하도록 설계하였다.

Fig. 2는 선박조종시뮬레이션 통합 시스템의 통항 안전성 평가를 위한 시스템 프로세스를 나타낸다.

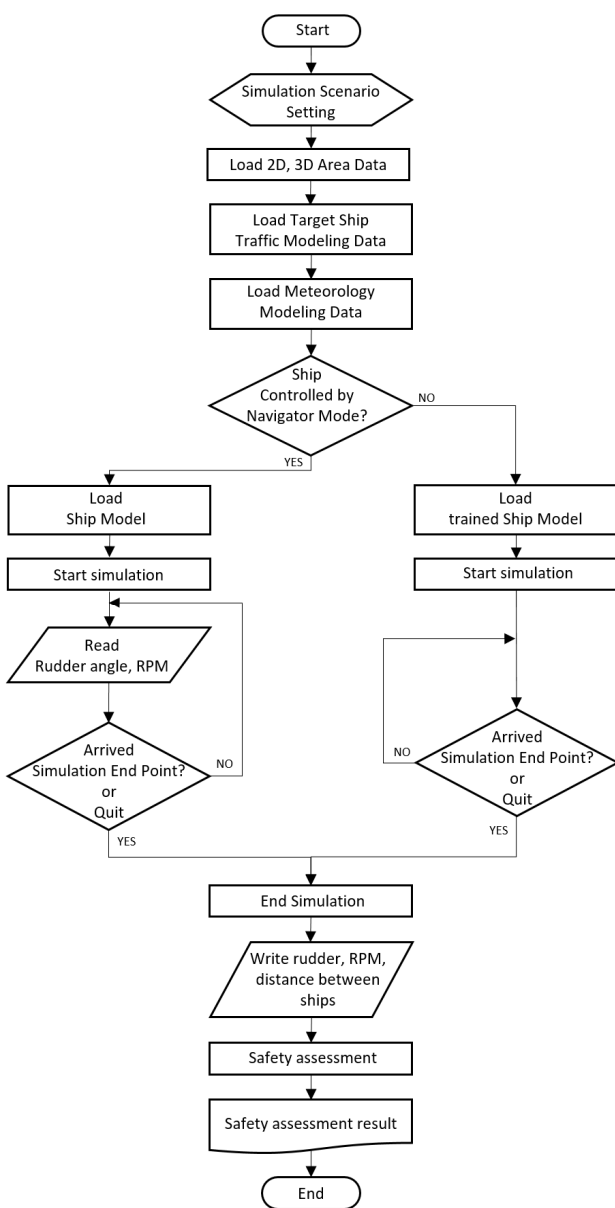


Fig. 2. System process.

선박조종시뮬레이션을 구현하기 위해서는 시뮬레이션 평가 수역 설정과 평가하고자 하는 선박 명세 등에 대한 입력이 필요하다. 따라서 시뮬레이션 시작 후 시뮬레이션 시나리오에 대한 초기값을 입력하도록 설계하였다. 그리고 평가 대상 해역의 자연환경 데이터, 타선의 교통 모델링 데이터, 기상 모델링 데이터를 불러와서 시뮬레이션 수행 시 필요한 요소들을 준비하는 과정을 거치도록 설계하였다.

다음 단계는 항해사가 직접 선박을 조종하는 시뮬레이션 모드와 자율운항선박 시뮬레이션 모드를 선택하는 것이다.

항해사가 직접 선박을 조종하는 시뮬레이션 모드에서는 시뮬레이션을 통해 평가하고자 하는 선박의 수확 모델을 불러온다. 그리고 항해사가 입력하는 타각, 엔진 RPM을 선박 모델에 실시간으로 입력하는 선박이 시뮬레이션 환경에서 거동할 수 있도록 하였으며, 시뮬레이션 종료 지점에 도착하거나 운영자가 종료시킬 경우 시뮬레이션이 끝나도록 설계하였다.

자율운항선박 시뮬레이션 모드에서는 시뮬레이션을 통해 평가하고자 하는 선박의 수확 모델을 불러온다. 다만, 평가 대상 선박은 자율운항이 가능한 학습된 모델이라는 점에서 항해사가 직접 조종하는 시뮬레이션 모드와는 다른 부분이다.

시뮬레이션이 종료되면 타각, RPM, 통항 선박과의 거리 등의 데이터를 저장장치에 기록한 후, 이 데이터를 기반으로 통항 안전성 평가를 실시하고, 그 결과를 도출한 후 시스템이 종료되도록 설계하였다.

3.2 시스템 내부 모듈에 대한 세부 사항

1) 선박 모델링

선박조종시뮬레이션 분야에서 시스템 모델링을 위해 사용하는 선박 모델은 Nomoto et al.(1957)이 제안한 K-T 응답 모델, 섭동 모델(Perturbation model), MMG 모델, cross-flow 모델 등 다양하다(Lee, 2011). 그러므로 선박의 시뮬레이션을 구성하기 위해서 선체(Hull), 프로펠러(Propeller), 타(Rudder), 프로펠러와 타의 상호 간섭, 선체와 프로펠러의 상호 간섭, 그리고 예선(Tug), 바람(Wind), 파랑(Wave) 등 외부 환경 요건이 반영되고, 6-DOF(Degree of Freedom, 이하 자유도) 운동이 가능하며, 일반적으로 사용되는 선박 조종 운동방정식의 선택이 요구된다. MMG 모델은 일본의 운동 수학 모델 검토 그룹인 MMG가 제안했다. 이 모델은 선체, 프로펠러, 방향타의 분리된 유체역학적 움직임 모델을 기반으로 모델을 구축하고 선박, 타, 방향타와 환경(풍속, 풍향, 파향, 파속, 유향, 유속) 사이의 유체역학적 간섭을 동시에 고려한다. 그리고 미분 방정식을 풀면 선박의 6-자유도 운동의 실시간 응답이 얻어지며 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 점에서 MMG 모델이 가장 적절할 것이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 선박조종시물레이션을 활용한 통항 안전성 평가 시스템에 MMG 모델을 적용하여 구성한다.

2) 자선의 자율운항 구현

강화학습 방법으로 자율운항선박을 구현한 사례로는 심층 강화학습을 이용한 자율운항선박의 충돌 회피 방법 연구(Wang et al., 2023), 심층 강화학습을 기반으로 선박 조종 연구(Deraj et al., 2023), 향상된 PPO 알고리즘을 활용한 고도화된 자율운항선박의 의사 결정 시스템에 대한 연구(Guan et al., 2022), 그리고 심층 강화학습을 기반으로 무인 선박의 침로 조종에 대한 연구(Wu et al., 2022) 등 다수 존재하는 것으로 조사되었다. 이러한 선행연구를 종합해 볼 때 자선의 자율운항을 실현하기 위해서는 정책 경사 기반 근위 정책 최적화(Proximal Policy Optimization, 이하 PPO) 알고리즘이 가장 적합할 것으로 판단된다. 이 알고리즘은 안정적이면서도 뛰어난 성능을 보이며, 특히 에이전트의 연속 행동 공간에 적합하다. 또한 PPO 알고리즘은 신뢰 영역에 기반한 정책 경사 알고리즘으로, 정책을 업데이트할 때 신뢰 구간을 통해 업데이트의 안정성을 보장한다. 이로써 연속 행동 집합인 정책을 업데이트할 때 예상치 못한 문제를 방지하면서도 효과적인 학습이 가능하다는 특징이 있다(Hong and Kim, 2021). PPO 알고리즘에서 손실함수는 식(1)과 같이 계산된다.

$$L(\theta) = E_t[\min(r_t(\theta), clip(r_t(\theta), 1-\epsilon, 1+\epsilon)) \hat{A}_t], \quad (1)$$

$$r_t(\theta) = \frac{\pi_\theta(a|s)}{\pi_{\theta_{old}}(a|s)}$$

여기서, θ : 정책

π_θ : 정책 θ 를 따랐을 때 행동 a 를 취할 확률값

$r_t(\theta)$: 이전 정책과 현재 정책의 확률값의 비율

\hat{A}_t : 시간 t 에서 이득값

따라서 본 연구에서는 자선의 자율운항선박 구현 방법으로 PPO 알고리즘을 이용해서 선박 모델을 학습하여 구현하는 방법으로 구성한다.

3) 타선의 해상 교통 모델링

해상에는 상선, 어선, 특수선, 그리고 레저 선박 등 다양한 선박이 안전에 유의해서 통항을 하고 있으며, 시간대에 따라서는 많은 선박의 통항이 집중되는 현상이 발생하기도 한다. 따라서 타선의 해상 교통 모델링을 구현할 때는 평가 대상 해역을 실제 통항하는 선박의 데이터로 구축할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 타선의 해상 교통

모델링 프로세스를 설계하여 시물레이션 시 반영될 수 있도록 하였다.

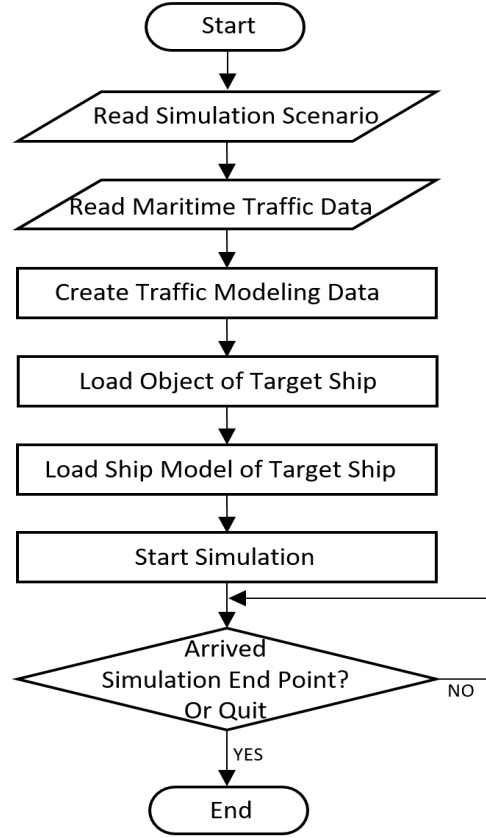


Fig. 3. Maritime modeling process in the target ships.

타선의 해상 교통 모델링을 구현하기 위해서는 우선 사용자로부터 시물레이션 조건 정보 등이 포함된 시나리오를 불러온다. 다음은 시물레이션하고자 하는 수역의 해상 교통 자료를 불러와서 해상 교통 모델링 자료를 생성한다. 해상 교통 모델링 자료에는 타선의 항적 데이터, 통항 빈도, 선종, 통항 시간, 선속 등이 포함된다. 그리고 생성된 해상 교통 모델링을 시물레이션 환경에서 구현하기 위한 타선 객체와 각각의 객체 특성을 고려한 선박 모델에 따라 타선 스스로 장애물을 회피하며 항해하도록 한다. 여기에서 타선의 자율운항을 위해서는 선박 모델에 대한 학습이 필요하다. 앞에서 자선은 MMG 선박 모델을 PPO 알고리즘을 사용하여 학습하여 자율운항을 구현하도록 하였다. 그러나 타선에 대해서는 MMG 선박 모델보다는 상대적으로 단순한 선박 모델을 사용하여 자율 운항이 구현되도록 할 필요가 있다. 왜냐하면 선박조종시물레이션을 이용해서 안전성을 평가하는 대상은 자선이므로 타선에 대해서까지 6-자유도 운동 기반의 선박 모델을 사용할 필요성이 적기 때문이다. 또한 시물

레이션 수행 환경은 일반적으로 자선보다는 타선의 척수가 많기 때문에, 타선에 복잡한 선박 모델을 사용하여 자율운항을 구현할 경우 상당히 높은 컴퓨터 성능이 필요하며, 그렇지 못한 경우 적절한 시뮬레이션 수행이 어려울 수 있다.

이에 타선은 3-자유도 운동 기반의 K-T 응답 모델을 PPO 알고리즘으로 학습시켜 자율운항 기능을 구현할 수 있도록 하였다. K-T 응답 모델은 타의 변화에 대한 회두각속도의 응답을 표시한 수학적 모델로 비교적 간단하며 선체의 조종운동을 유체력의 관점이 아니라 주어진 힘(타각의 힘)에 대한 선체의 응답(회두운동)의 관계로서 나타낸 모형으로 수식이 선형상으로는 표시되는 장점을 갖고 있다(Chol et al., 2019).

K-T 응답 모델의 일반적 형태는 식(2)와 같다.

$$Tr + r = K\delta \quad (2)$$

$$T\dot{v} + v = V_d$$

여기서, K : 선회성 지수

T : 추종성 지수

r : 선회율

v : 선속

δ : 타각

V_d : 수렴 속도

이를 통해, 교통 모델링 자료에 따라 타선을 생성할 수 있고, 생성된 타선은 K-T 응답모델에 따라 장애물을 스스로 회피할 수 있는 등 실제와 유사한 시뮬레이션 환경을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 시뮬레이션 해양 기상 모델링

해양환경에서는 바람, 조류, 파도에 의한 외력이 작용한다. 따라서 이러한 해양환경을 실제와 유사하게 모델링하는 과정이 필요하다. 그러나 현재의 선박조종시뮬레이션은 시뮬레이터 운영자가 직접 입력해야 하므로 실제와 유사하게 모사할 수 없으며, 시뮬레이션 상황에 따라 운영자가 임의로 환경 조건을 조절할 수 있기 때문에 일부에서는 선박조종시뮬레이션을 통한 안전성 평가 신뢰성에 의문을 제기하는 것도 사실이다.

이를 개선하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 기상청 해양 기상 자료 데이터베이스로부터 조위, 파랑, 조류, 바람에 대한 자료를 수집하여 수치 모델을 수립하고 이를 기반으로 해양기상 모델을 생성한다. 그리고 이를 선박조종시뮬레이터 반영하여 수치 모델에 따른 해양 기상이 재현되도록 설계하였다.

5) 통항 안전성 평가 방법

선박조종시뮬레이션이 종료되면 통항 안전성 평가를 위해 필요한 자료(타각, 엔진 RPM, 장애물 또는 선박과의 이격거리 등)를 저장장치에 저장하고, 통항 안전성 평가 방법에 의해 평가하고, 그 결과를 자동으로 도출되도록 한다.

현행 해상교통안전진단 시행지침에 명기된 통항 안전성 평가 방법은 근접도 평가, 제어도 평가, 선박운항자(주관적) 평가, 그리고 해상 교통류 평가가 있으며 이를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

근접도 평가(Proximity, PI)는 식(3)과 같이 자선의 항적을 기초로 시설물 또는 선박과의 최근접거리의 평균치(μ)와 표준편차(σ)를 이용하여 정규분포 확률변수의 기준값 $\xi = (X - \mu) / \sigma$ 을 기초로 평가하고 있다.

$$PI = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (3)$$

선박의 제어도 평가(Control Index, CI)는 식(4)와 같이 엔진(최대 RPM 대비 사용 RPM)과 조타기(최대 타각 대비 사용 타각)에 대한 사용량이나 여유 사용량으로 다음과 같이 평가한다.

$$CI_R = \epsilon_{rudder} = \frac{1}{T} \int_0^t [1.0 - \frac{|\delta(t)|}{\delta_{MAX}}] dt \quad (4)$$

$$CI_E = \epsilon_{engine} = \frac{1}{T} \int_0^t [1.0 - \frac{|RPM(t)|}{RPM_{MAX}}] dt$$

선박운항자(주관적) 평가는 운항자가 조선 시 느끼는 심리적인 위험이나 곤란도를 Rate scale 7단계로 분류하여 도선사 또는 선장이 주관적으로 평가하는 방법이다. 이 방법은 통항 안전성 평가 방법 중 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.

해상 교통류 평가는 선박 통항과 유사한 조선 환경을 설정하여 현실적 충돌 위험도 및 잠재적 충돌 위험을 분석함으로써 해역 안전성 평가의 정량적인 결과 및 위험해역 도출 결과를 제시한다.

통항 안전성 평가 기법은 안전성 여부를 판별하는 근거가 되기 때문에 충분한 객관성 및 과학적 검증이 선행되어야 한다. 그러나 기존의 평가 기법은 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 분석된다. 첫째, 운항자의 주관적 평가는 항해사가 직접 선박을 조종하는 시뮬레이션 모드에서만 할 수 있으며, 자율운항선박 시뮬레이션 모드에서는 할 수 없다는 것이다. 둘째, 해상 교통류 평가는 선박조종시뮬레이터가 아닌 다른 프로그램을 이용해야 하기 때문에 효율적인 평가가 어렵고, 해상 교통류 평가 시 발생된 선박 객체들에 자율운

항 기능이 부여되지 않고, 자연 환경 요소도 반영되지 않아 실제 상황에서 발생할 수 있는 충돌 위험 상황을 현실적으로 재현할 수 없다는 점이다.

따라서 본 연구에서 설계한 선박조종시물레이션을 이용한 통합 안전성 평가 시스템은 근접도 평가와 제어도 평가 기법을 적용하여 자동으로 평가 결과를 도출하도록 한다. 그리고 항해사가 직접 선박을 조종하는 시물레이션 모드에서만 선박 운항자의 주관적 평가 결과를 반영하도록 한다. 또한 해상 교통류 시물레이션은 본 연구에서 구현한 타선의 해상 교통 모델이 선박조종시물레이터에 포함되어 있기 때문에 시스템 내에서 평가가 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 항해사가 직접 조종하는 선박과 MASS가 공존하는 해상환경 하에서 선박조종시물레이션으로 통항 안전성을 평가하는 통합 시스템 개발을 위한 첫 단계로서 기본 설계 방안을 제안하였다.

선박조종시물레이션을 활용한 통항 안전성 통합 시스템은 운영자가 평가하고자 하는 자선의 운항 형태에 따라 선택할 수 있도록 항해사가 직접 선박을 조종하는 시물레이션 모드와 자율운항선박 시물레이션 모드로 설계하였다. 여기서 항해사가 직접 선박을 조종하는 시물레이션 모드에서의 자선은 운항자에 의해 실시간으로 입력되는 타각, 엔진 RPM을 선박운동모델에 입력하여 항해할 수 있도록 하였다. 그리고 자율운항모드에서의 자선은 6-자유도 운동 기반의 MMG 모델을 PPO 알고리즘으로 학습하여 장애물 등을 스스로 회피할 수 있는 자율운항 기능을 갖출 수 있도록 설계하였다. 타선은 평가 대상 해역의 해상 교통 자료를 토대로 해상 교통 모델링 자료(통항 빈도, 선종, 통항 시간, 선속)를 구축하고 이를 시물레이션 공간에서 구현되도록 설계하였다. 그리고 시물레이션 공간에 많은 척수의 타선이 생성됨으로써 발생할 수 있는 컴퓨터 성능 문제 등을 고려하여 3-자유도 운동 기반의 K-T 응답 모델을 PPO 알고리즘으로 학습시켜 자율운항 기능을 구현할 수 있도록 하였다. 그리고 해양 기상 자료 데이터베이스로부터 조위, 파랑, 조류, 바람에 대한 자료를 수집하여 수치 모델을 수립하고 이를 기반으로 해양기상 모델을 생성하여 시물레이터 상에서 해양 기상이 재현되도록 설계하였다. 마지막으로 안전성 평가는 기존의 평가 방법은 그대로 유지하되, 해상교통시물레이션에서 해상교통류 시물레이션을 통한 충돌 위험성 평가가 가능하도록 하는 시스템을 제안하였다.

본 연구는 항해사가 직접 조종하는 선박과 MASS가 공존하는 해상환경 하에서 해상 교통의 안전성을 평가할 수 있

는 방안을 제시했다는 점에서 의미가 있다. 다만, 연구를 통해 제안한 시스템을 구현하여 검증하지 못한 부분은 한계점이라고 할 수 있다. 이에 향후에는 본 연구에서 제시한 시스템 설계를 구체화하고 컴퓨터 프로그램으로 구현하여 안전성 평가를 실시하며 그 결과에 대한 유효성을 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 2022년도 목포해양대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구결과임.

References

- [1] Choi, W. J., H. I. Kim, and S. H. Jun(2019), Development of the Ship Manoeuvring PC Simulator Based on the Network, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 43, No. 6, pp. 403-412.
- [2] Gong, I. Y., Y. H. Kim, S. M. Kim, and I. H. Youn(2022), Review of Operation Concept and System Requirements for Shore Remote Control Simulator System for MASS, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 28, No. 5, pp. 937-945.
- [3] Guan, W., Z. Cui, and X. Zhang(2022), Intelligent Smart Marine Autonomous Surface Ship Decision System Based on Improved PPO Algorithm, *Sensors*, Vol. 22, No. 5732, pp. 1-33.
- [4] Hong, S. J. and J. H. Kim(2021), Reinforcement Learning Based Tugboats Control for Autonomous Ship Berthing, *Journal of the Korea Society for Naval Science & Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 72-77.
- [5] Kim, H. J.(2019), Basic Research on the Agent Based M&S for Maritime Traffic Analysis, *Proceedings of the 2019 Spring Conference of the Korean Navigation and Port Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 10-11.
- [6] Lee, Y. S.(2011), A Study on Adequacy of Audit Techniques and Advancement of Ship-Handling Simulation for Maritime Safety Audit, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 17, No. 4, pp. 391-398.
- [7] MOF(2022), Guidelines for the Implementation of Maritime Safety Audit, Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 1-10.
- [8] Nomoto, K., K. Taguchi, K. Honda, and S. Hirono(1957), On the Steering Qualities of Ships, *ISP*, Vol. 4.
- [9] Park, S. K., J. Y. Oh, and H. J. Kim(2019), The Analysis of

Reinforcement Learning Environment for Intelligent Ship Navigation Agents, Proceedings of the 2019 Spring Conference of the Korean Navigation and Port Research, Vol. 1, No. 1, pp. 3-4.

- [10] Deraj, R., R. S. Sanjeev Kumar, Md Shadab Alam, and Abhilash Somayajul(2023), Deep reinforcement learning based controller for ship navigation, Ocean Engineering, Vol. 273, No. 113937, pp. 1-18.
- [11] Seong, Y. C.(2010), The Study on Development of Intergrated Ship's Traffic Flow Simulation Model based on Collision Avoidance Function, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 16, No. 1, pp. 101-106.
- [12] Wang, C., X. Zhang, Z. Yang, M. Bashir, and K. Lee(2023), Collision avoidance for autonomous ship using deep reinforcement learning and prior-knowledge-based approximate representation, Frontiers in Marine Science, pp. 1-14.
- [13] Wu, D., Y. Lei, M. He, C. Zhang, and L. Ji(2022), Deep Reinforcement Learning-Based Path Control and Optimization for Unmanned Ships, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 2022, No. 7135043, pp. 1-8.

Received : 2024. 02. 02.

Revised : 2024. 02. 16.

Accepted : 2024. 02. 23.