



자유항주 모형시험을 활용한 선박 충돌사고 재현에 관한 연구

박한솔·손남선[†]·표춘선
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study on Playback of Ship Collision Accident Using Free Running Model Test
Hansol Park·Nam Sun Son[†]·Chun Seon Pyo
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

According to Korea Maritime Safety Tribunal, there have been 14,100 maritime accidents from 2017 to 2021. Among those accidents, ship collision accidents have been up to 1,275 cases. But in the accidents relating to small ships like a fishing vessel, analyzing the causes of the accidents would depend on statements of the persons related because there is often no navigational data. But those statements can be incorrect and give rise to disagreements between them so that it causes conflicts with each other during the trial. So a replay system of ship collision accident (RESCA) has been developed in order to reproduce the ship collision accident by using AIS, V-PASS or radar data. But the reproduced trajectory of ship collision accident is needed to be verified because it can be unreasonable physically. So a method to verify the reproduced trajectory and collect the physical data on ship collision accident is newly designed by using free running test. In the RESCA, the accident is reproduced using the navigational data from the trajectory for a ship and measured from free running model test for the other ship at the same time. Through free running test, the behavior of the model ship is transformed from model scale into real scale. In order to check into the accuracy of the new method, free running model tests by using RESCA are carried out on the actual ship collision accidents.

Keywords : Ship collision accident(선박 충돌사고), Playback of ship collision(선박 충돌재현), Free running model test(자유항주시험)

1. 서론

최근 5년(2017~2021)간 해양사고통계에 따르면, 선박 충돌 사고는 총 14,100건의 해양사고 중 1,275건에 달한다 (Korea Maritime Safety Tribunal, 2022). 이러한 선박 충돌사고가 발생하면 중앙해양안전심판원(지방해양안전심판원 포함)에서 해양사고 조사 및 심판절차를 거쳐 재결을 확정하고 집행하게 된다.

이러한 선박 충돌사고의 원인을 분석하기 위해, 과거에는 사고 선박의 당사자들의 진술을 통해 항적을 플로팅하는 과정을 수작업으로 진행하면서 많은 시간이 소요되고 오류가 발생할 수 있었다 (Park, 2002; Cheun, 2003; Kim et al., 2006; Kim, 2007). 또한, 당사자들 간 진술이 부정확하고 객관적이지 못한 경우 상황파악이 어려우므로 과학적으로 사고원인을 분석하기 위한 시스템의 필요성이 요구되어 왔다 (Park, 2002; Cheun, 2003; Kim et al., 2006; Kim, 2007). 따라서, 선박 충돌사고의 원인

을 과학적으로 분석하기 위해 여러 연구들이 진행되었다. 먼저, 사고 당사자들의 진술을 기반으로 충돌사고를 시각적으로 재현하기 위한 시뮬레이터가 개발되었다 (Park, 2002; Cheun, 2003). 본 시뮬레이터를 통해 사고 전후의 선박 궤적을 계산하고 2D 도면상에서 시각화함으로써, 당사자들 간 진술의 정확성을 확인하고 수작업으로 진행되던 플롯의 오류를 해결할 수 있었다. 이후, 사고를 3D로 시각화하여 당시 상황을 더 쉽게 이해할 수 있도록 하는 3차원 선박충돌 시뮬레이터 시스템이 개발되었다 (Kim et al., 2006; Kim, 2007). 해당 시뮬레이터에서는 선박 뿐만 아니라 3D 항만모델도 포함되어 있으며, 환경적인 요소(기상, 시정 등)에 대한 모드 설정도 가능하였다. 또한, 해양사고를 대상으로 한 시뮬레이션 기술도 개발되었는데 (Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO), 2019), 다양한 해양사고 시뮬레이션 및 재현을 위해 데이터 분석시스템 및 시나리오 관리 시스템을 구현하고 이를 통해 2D와 3D로 재현할 수 있도록 하였다.

한편, 선박해양플랜트연구소에서는 2014년부터 해양경찰연구센터 지원 하에, AIS 선박충돌사고 데이터를 이용하여 2차원 전자해도 및 3차원 가상현실상에 충돌사고를 재현하고 원인을 분석할 수 있는 선박충돌 사고재현 시스템을 개발 (KRISO, 2017; Son and Pyo, 2017)하였으며, 이를 바탕으로 2019년부터는 AIS 등 운항 데이터가 없는 경우, 레이더를 이용하여 선박충돌사고를 재현하는 시스템으로 개선하였다. 본 시스템은 선박충돌사고 재현 모드와 회피 시뮬레이션 모드가 있으며, 선박충돌위험도 (Son and Kim, 2010) 기반으로 운항과실을 분석하고 (Son, 2016), 피항 가능성을 평가할 수 있는 기능이 있다 (Son, 2019).

선박충돌재현시스템의 사고 재현은 AIS와 같은 운항데이터를 기반으로 진행되나, 수신주기가 불규칙적이므로, 데이터가 부재한 경우, 내삽 혹은 시뮬레이션 등을 통해 재현한다. 따라서, 선박충돌재현 시스템의 궤적 재현이 물리적으로 타당한지 검증이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 선박충돌재현 시스템에서 재현한 항적 데이터가 실제 물리적으로 타당한지 검증하기 위해 자유항주 모형시험을 이용한 선박 충돌재현 시험시스템을 개발하였다. 모형시험 기능에는 추정된 충돌사고 궤적을 추종하기 위한 경로추종 알고리즘이 포함되어 있으며, 모형시험에서 계측되는 항법데이터를 표시할 때 실제 사고 선박의 스케일로 변환 후 표시하여 바로 비교할 수 있도록 구성하였다. 이를 통해 추정된 궤적이 물리적으로 타당한지 확인할 수 있다. 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현 시험 시스템의 성능을 검증하기 위하여, 실제 선박충돌사고 사례 2건에 대한 실제 사고궤적을 확보하고, 해당 궤적을 추종하는 자유항주시험을 실시한 후 추종오차를 비교하였다.

2. 선박 충돌사고 재현 시험시스템

2.1 자유항주 모형시험 기반 선박 충돌사고 재현

본 연구에서 수행한 자유항주 모형시험 기반 선박 충돌사고 재현은 크게 2단계로 나뉜다. 첫 단계에서는 자유항주 모형시험에서 모형선(ship 1)이 충돌사고 당시의 조건을 얻기 위해 충돌 궤적으로 진입하기 전까지 모형선의 초기 상태를 일정시간 계측한 후 가속하고 정속을 충분히 유지하게 된다. 두 번째 단계에서는 모형선이 충돌 궤적으로 진입하며 재현 프로그램 상에서는 실제 사고 선박으로 표시되고, 동시에 가상의 다른 사고 선박(ship 2)도 재현이 시작되면서 사고를 재현하게 된다. 이러한 자유항주 모형시험 기반 선박 충돌사고 재현의 전체적인 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 선박 충돌사고 재현 시험시스템 개요

본 시험시스템의 성능을 검증하기 위하여, 선박충돌 사고 재현 시 활용되는 충돌선박의 궤적은 실제 사고 궤적으로부터 경유점 정보를 추출한 후 적용하였다. 단, 선박충돌사고시 물리적 검

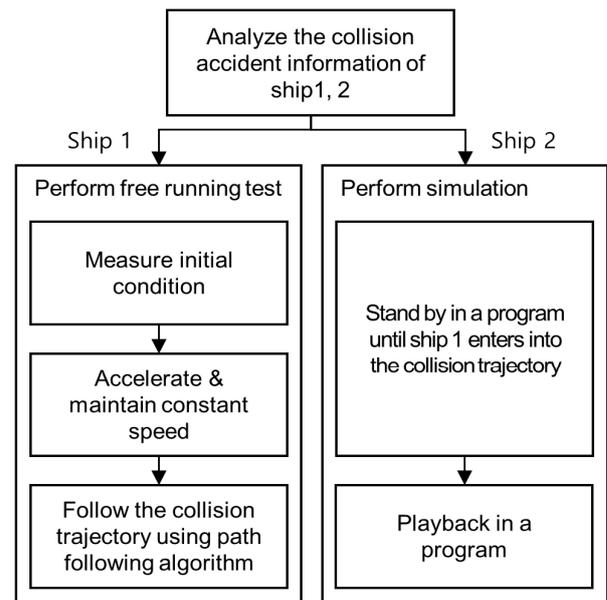


Fig. 1 The procedure of playback of ship collision accident based on the free running test

Table 1 Froude scale conversion

Item	Conversion
Scale	$\lambda = L_s / L_m$
Time	$t_s = \sqrt{\lambda} t_m$
Length	$L_s = \lambda L_m$
Position	$x_s = \lambda x_m, y_s = \lambda y_m$
Angle	$\phi_s = \phi_m, \theta_s = \theta_m, \psi_s = \psi_m, \delta_s = \delta_m$
Speed	$U_s = \sqrt{\lambda} U_m$
Angular rate	$\dot{\phi}_s = \dot{\phi}_m / \sqrt{\lambda}, \dot{\theta}_s = \dot{\theta}_m / \sqrt{\lambda}, \dot{\psi}_s = \dot{\psi}_m / \sqrt{\lambda}, \dot{\delta}_s = \dot{\delta}_m / \sqrt{\lambda}$

* The subscript 's' refers to a real ship, 'm' does a model ship
 ** where λ is scale, t is time, L is length, ϕ is roll angle, θ is pitch angle, ψ is yaw angle, δ is rudder angle and upper dot refers to time derivative

증이 필요한 한 척은 자유항주시험으로부터 얻는 모형 스케일의 결과를 실제 사고 선박의 스케일로 변환하여 프로그램의 전자해도에 표시하였고, 다른 한 척은 가상의 선박으로 프로그램 상에서 재현하였다. 이 때 자유항주시험 시 모형선과 실제 사고 선박 간 물리량 스케일 변환은 Froude scale law를 활용하여 Table 1과 같이 변환하였다.

또한, 자유항주 모형시험이 수행되는 장소는 충돌사고가 일어난 장소와 다른 곳이므로, 스케일 변환 뿐만 아니라 위치와 선수각 변환까지도 수행되어야 전자해도 상의 사고해역에서 그 결과를 표시할 수 있다. 따라서, 자유항주시험 계측 데이터를 프로그램 상에서는 위치와 선수각을 변환하여 사고해역에서의 충돌궤적으로 표시한다. 이를 그림으로 표시하면 Fig. 2와 같다.

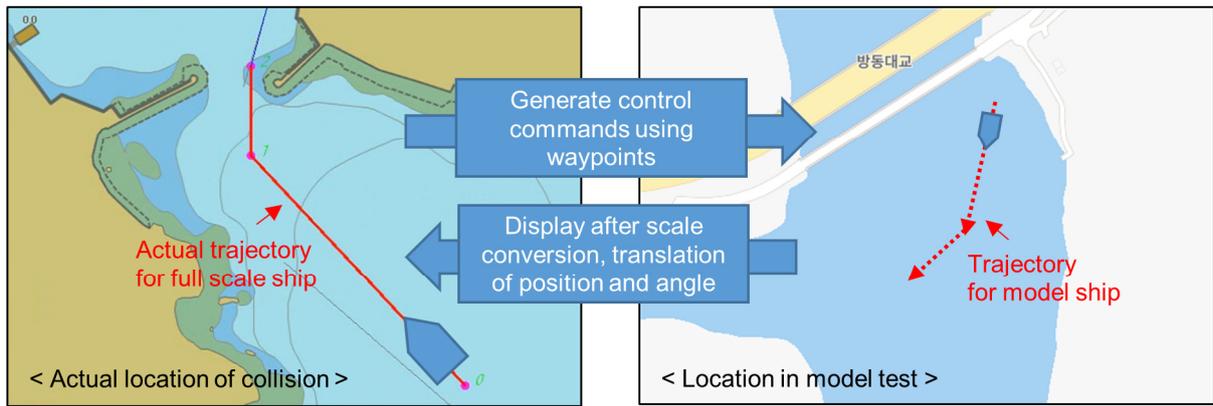


Fig. 2 Transformation and display of trajectory from the location of free running model test to actual location of ship collision

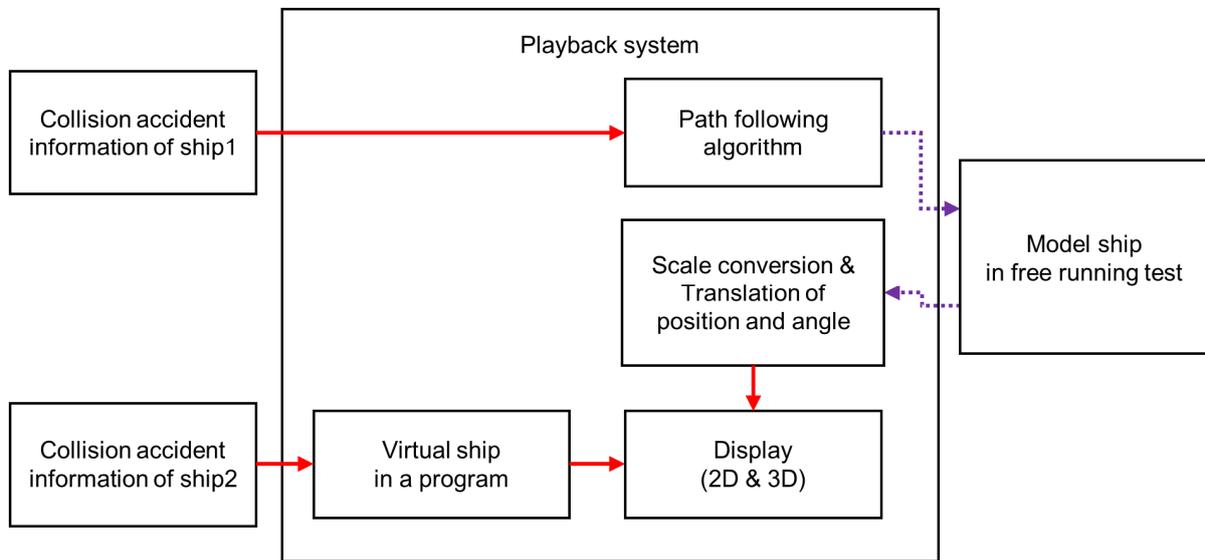


Fig. 3 Concept diagram of RESCA based on free running test(Red arrow: the data flow of full scale, purple dotted arrow: the data flow of model scale)

이상 설명된 자유항주시험 기법을 활용한 선박 충돌사고 재현 시스템(RESCA: REplay system of Ship Collision Accident)의 개요를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 빨간색 선은 실제 선박 스케일의 데이터를, 보라색 점선은 모형 스케일의 데이터 흐름을 나타낸다. 경로추종 알고리즘(path following algorithm)에서 제어 명령이 계산되고 모형선이 제어되면, 앞서 언급된 대로 계속되는 데이터를 실선으로 스케일을 변환하고 평행이동 및 회전하여 2D 전자해도와 3D 화면으로 표시하게 된다. Fig. 4는 자유항주 모형시험 기능이 구현된 선박충돌 재현시스템과 그 사용자 인터페이스 화면을 보여준다. Fig. 4에서 보이는 것처럼 사고 당시의 상황을 보다 현실적으로 확인할 수 있도록 2D 전자해도와 3D 화면으로 볼 수 있도록 구현되어 있다. 2D 전자해도와 3D 화면에는 실제 사고가 났던 해역의 주변 환경(건물, 교량 등)과 선박의 모델링까지 포함되어 있어 실제와 유사하게 사고를 재현할 수 있도록 구현되어 있다.



Fig. 4 View of RESCA (Above: 3D, below: 2D(ENC: Electronic Navigational Chart))

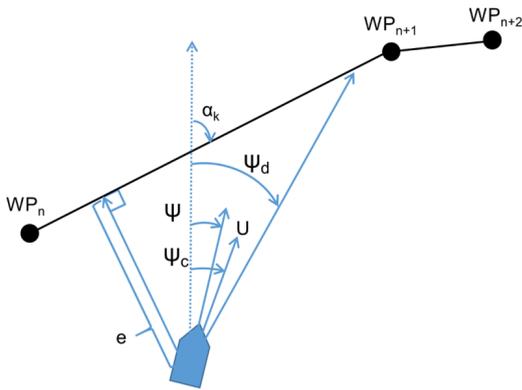


Fig. 5 Path following algorithm(WP: Way Point, black line: path)

2.2 경로추종 알고리즘

자유항주 모형시험에서 충돌궤적을 추종하기 위해 사용된 경로추종 알고리즘을 Fig. 5 및 아래에 나타내었다 (Fossen, 2011; Cho et al., 2019).

$$\psi_d = \psi_p + \psi_e = \alpha_k - k_e e \quad (1)$$

여기서 ψ_d 는 목표 침로각, ψ_p 와 α_k 는 경로의 방위각, ψ_e 는 경로와의 오차를 줄이기 위한 변침각, e 는 경로에 대한 수직거리오차(CTE; Cross Track Error) 및 k_e 는 CTE 관련 제어이득을 나타낸다. 매 순간에서의 경로를 추종하기 위한 목표 선수각을 계산한 후, 그에 따른 명령 타각은 식 (2)와 같이 PD(Proportional-Derivative) 제어를 활용하여 계산하였다.

$$\delta_{cmd} = k_p(\psi_d - \psi_c) + k_d r \quad (2)$$

여기서 δ_{cmd} 는 명령 타각, k_p 는 비례제어이득, ψ_c 는 현재 침로각, k_d 는 미분제어이득 및 r 은 선수각속도를 의미한다. 이를 이용하여 매 순간에서의 명령 타각을 계산한 후 모형선을 제어하는데 활용하였다.

프로펠러 RPS 명령의 경우, 여러 번의 속도시험을 통해 모형선 속도를 계측하고 데이터화 한 후 활용하였다.

3. 선박 충돌사고 재현시험

3.1 대상 선박충돌사고

본 논문에서는 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현시험 시스템을 검증하기 위하여, 총 2건의 실제 선박충돌사고에 대해 다루었다. 첫 번째 충돌사고(case 1)는 2005년 경남에서 발생한 사고이다 (Regional Maritime Safety Tribunal(Busan), 2005). 총톤수 294톤급 선박 A와 3톤급 선박 B가 충돌한 사고이다. 본 사

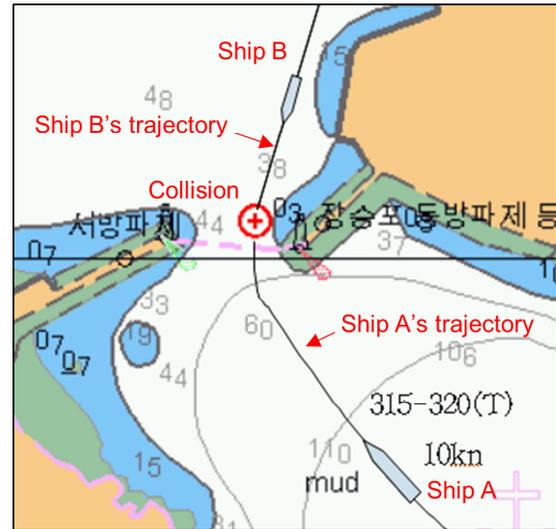


Fig. 6 The path of actual ship collision accident for case 1 (Regional Maritime Safety Tribunal(Busan), 2005)

고에서 장승포항 출입구인 서방파제와 동방파제 사이로 315-320도 방향 약 10knots로 모형선에 해당하는 선박 A가 접근하고 있었으며, 이후 방파제를 통과하는 도중 약 197도 방향 및 속력 2~3knots로 장승포항에서 나오고 있던 선박 B가 충돌하였다. 그 궤적은 Fig. 6과 같다.

두 번째 충돌사고(case 2)는 2016년에 전북에서 발생한 사고이다 (Regional Maritime Safety Tribunal(Incheon), 2016). 총톤수 99톤급 선박 C와 7톤급 선박 D가 충돌한 사고이다. 본 사고에서 모형선에 해당하는 선박 C가 선유도 선착장을 출발하여 선유도와 무녀도 사이의 좁은 수로를 따라 약 45도 방향으로 이동 중 침로를 약 61도로 변침 후 속력을 약 6.2knots까지 감속한 상태였고, 반대편에서는 선박 D가 약 230도 방향으로 약 7knots의 속력으로 접근하던 중 서로 충돌하였다. 그 궤적은 Fig. 7과 같다.

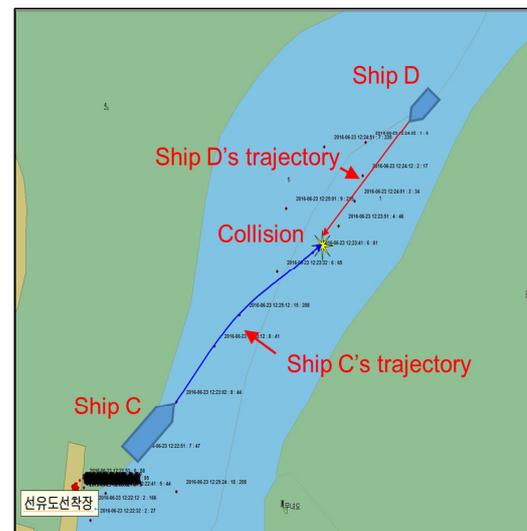


Fig. 7 The path for case 2(Regional Maritime Safety Tribunal (Incheon), 2016)

Table 2 Main particulars of the model ships for each case

Item	Unit	Case 1 (Ship A)	Case 2 (Ship C)
Length	m	31.5	23.3
Breadth	m	11.3	6.9
Displacement*	ton	262.9	95.4
Speed**	knots	10.0	6.2

* Displacements were assumed

** Speed refers to the speed which ships collided at

각 충돌사고 Case에서 모형선에 해당하는 선박의 제원을 Table 2에 나타내었다.

3.2 모형선

본 논문에서 다루는 실제 선박사고 2건에서 자유항주시험으로 검증할 대상 선박은 쌍동선형이다. 다만 사고 선박의 선형을 활용하여 모형선을 제작하기는 어려우므로, 선박해양플랜트연구소에서 보유하고 있는 쌍동형 모형선을 활용하였다. 쌍동형 모형선의 단동선 간 폭은 조절이 가능하므로, 사고 선박의 길이와 모형선 길이에 따른 Scale을 활용하여 전체 폭과 무게만 맞춰서 시험에 활용하였다. 각 충돌사고 Case의 모형선의 주요 제원은 Table 3과 같다.

자유항주 모형시험을 위하여 모형선과 원격관제소를 구축하였으며, 모형선내에는 원격관제소와 통신을 하기 위한 무선통신장비와 항법정보, 운동정보를 계측하기 위한 GPS 및 Gyro, 전원공급을 위한 배터리(power supply), 추진기와 추진기 제어기 및 PC가 탑재되어 있으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. 추진기는 Saildrive 타입의 쌍축추진기가 설치되었다.

Table 3 Main particulars of the model ships for each case

Item	Unit	Case 1 (Ship A)	Case 2 (Ship C)
Scale	-	11.8	8.7
L_{OA} *	m	2.67	
L_{BP} **	m	2.32	
Breadth	m	0.96	0.79
Draft	m	0.16	0.14
Displacement	ton	0.16	0.14
Speed	knots	2.9	2.1

* LOA was used for non-dimensionalization in all results of the tests excluding the results of maneuvering test.

** LBP was estimated based on the model ship and only used for non-dimensionalization in results of maneuvering test.



(a) Side view



(b) Front view



(c) Rear view

Fig. 8 Model ship for the ship A

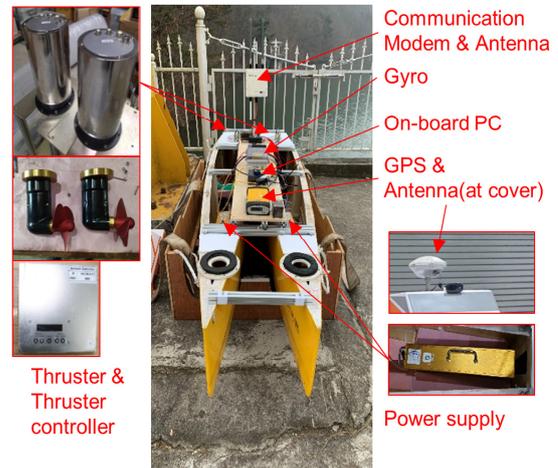


Fig. 9 Equipments for the free running model test

Case 1(Ship A)에 대한 모형선을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 10에는 자유항주시험 장비의 연결도를 나타내었다.

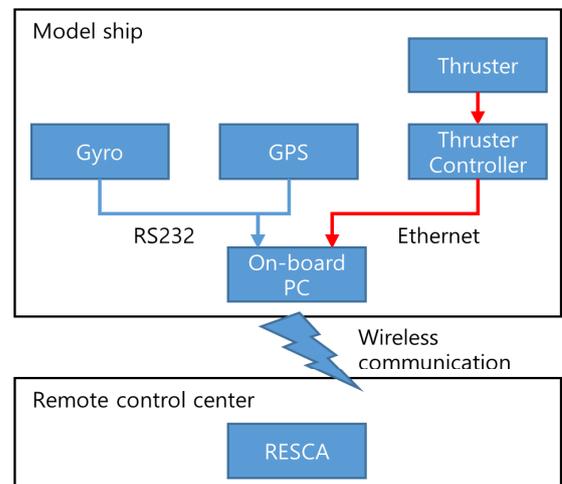


Fig. 10 Diagram of equipments of the free running model test



Fig. 11 RESCA and CCTV monitor in remote control center at Bangdong reservoir

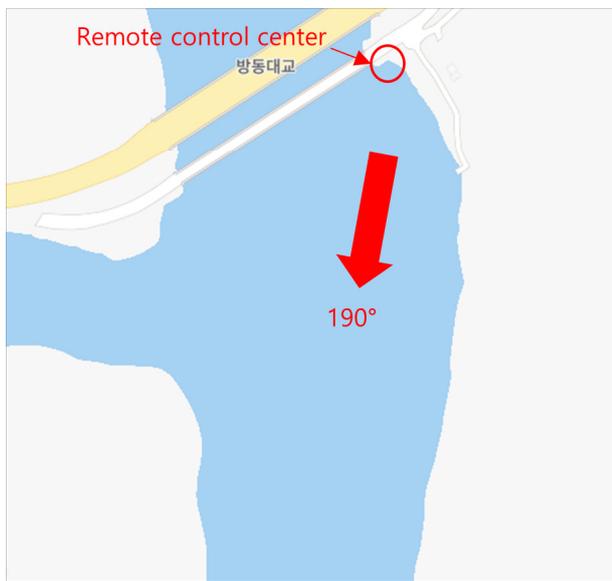


Fig. 12 Main direction of the free running model test

3.3 자유항주 모형시험 옥외시험장

자유항주 모형시험은 대전광역시 유성구에 있는 방동저수지에 서 수행되었으며, 원격으로 제어하기 위한 원격관제소가 설치되어 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이, 원격관제소에는 자유항주 모형선에 탑재된 PC와 연결되어 모형선을 원격으로 제어하고 화면에 표시하기 위한 선박충돌재현시스템 PC가 설치되어 있으며, 모형시험을 원격으로 모니터링하기 위한 CCTV 모니터가 갖추어져 있다.

자유항주 모형시험은 방동저수지에서 진북좌표계 기준 190° 방향으로 수행되었으며, 이를 원격관제소 위치와 함께 Fig. 12에 표시하였다.

3.4 사전 모형시험

선박 충돌사고 재현을 위해서는 충돌 궤적을 최대한 그대로 추종할 수 있도록 해야 하기 때문에, 조종성능과 경로추종 알고리즘 성능을 확인하기 위한 시험이 사전에 수행되었다. 먼저 각

Table 4 Maneuverability of the ships for each case

Test	Item	Unit	Case 1 (Ship A)	Case 2 (Ship C)	
Turning	Advance	L _{BP}	4.0	3.8	
	Tactical diameter	L _{BP}	4.6	4.4	
Zigzag	10°/10°	1 st Overshoot angle	°	4.5	4.9
		2 nd Overshoot angle	°	5.5	5.5
	20°/20°	1 st Overshoot angle	°	11.5	10.9

Table 5 The path information used for checking the performance of path following algorithm

Section	Length(L _{OA})	Course changing angle(°)
WP ₀ -WP ₁	10	-
WP ₁ -WP ₂	10	-30
WP ₂ -WP ₃	10	60
WP ₃ -WP ₄	10	-90
WP ₄ -WP ₅	10	90
WP ₅ -WP ₆	10	-45
WP ₆ -WP ₇	10	-45
WP ₇ -WP ₈	10	-90
WP ₈ -WP ₉	60	-55

Case 별 모형선에 대해 조종성능 시험을 수행한 결과, Table 4 와 같은 결과를 얻었다.

본 시험 선형은 조종성능이 알려진 바 없으므로, IMO 기준을 최소한 만족하는지 여부를 비교했을 때, 선회성능과 변침성능 중 10°/10° 및 20°/20° 지그재그의 Overshoot angle 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

조종시험을 통해 모형선이 35도 타각 실행 시 선수각 90도 회전을 위해 어느 정도 거리가 필요한지 등을 확인할 수 있고, 이를 통해 경유점 통과 전 어느 정도 거리에서부터 다음 경유점을 향해 변침을 해야 경로를 더 잘 추종할 수 있는지 대략적으로 가늠할 수 있다. 전진거리가 4.0L_{BP} 수준이고, 실제 시험 시 타각을 최대 ±20° 이하로 사용하는 것을 감안하여 경유점으로부터 3.0~4.0L_{OA} 정도 전 다음 경유점을 향하도록 설정하였다.

그리고 경로추종 알고리즘의 추종 성능을 확인하기 위해, Table 5와 같이 다양한 변침각을 갖는 경로를 설정하고 Case 1에 해당하는 모형선과 속력으로 시험을 수행하였다.

시험 결과, 경로와 시험궤적을 보면 Fig. 13과 같다.(빨간색: 경로, 파란색: 시험궤적)

본 시험에서는 모형선이 경로를 잘 추종하는지 판단하기 위한 파라미터로 실제 궤적과 경로 사이의 수직거리오차(CTE)의 제곱평균제곱근(RMS; Root Mean Square) 값을 활용하였으며, 본 시

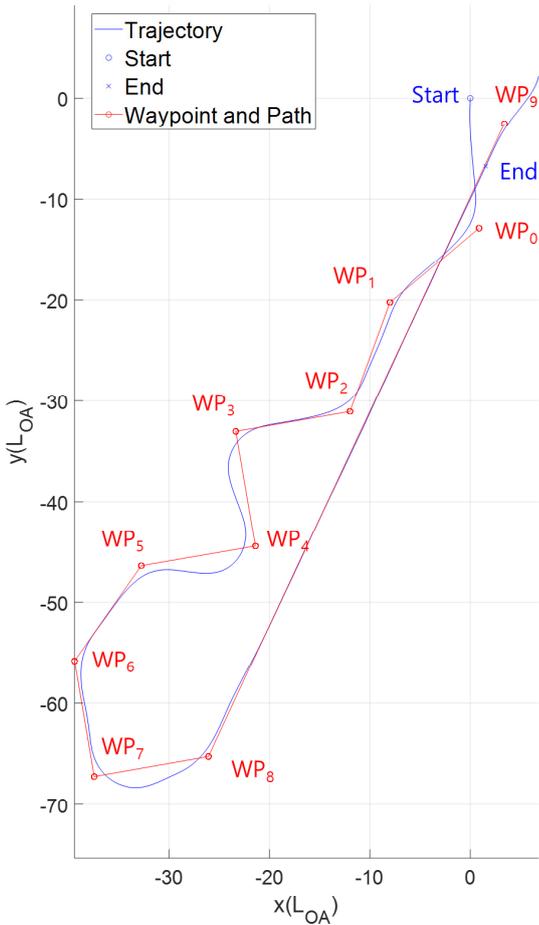


Fig. 13 The path(red line) and trajectory(blue line) of the test to check the performance of the path following algorithm

험에서는 $0.53L_{OA}$ 을 얻었다. 세밀한 조정을 위해서는 모형선 또는 실험 별로 경유점 도착 기준을 판단하기 위한 반경과 같은 값 등 제어 변수들의 값 조절이 필요할 수 있으나, 이번 시험을 통해 경로추종제어 알고리즘이 잘 작동하고 다양한 변침각에서 실제 궤적과 경로 사이의 오차가 상당히 작은 것을 확인할 수 있었다.

4. 선박 충돌사고 재현시험 결과

4.1 선박충돌 사고 사례1 시험결과

Case 1에 대한 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현 시험 결과, 얻어진 모형선 충돌 궤적 및 이를 이용해 변환된 실선 충돌 궤적은 Fig. 14와 같다.

Fig. 14의 궤적에서, 모형선의 가속정속 구간 이후부터 재현 시험을 시작하였다. 모형선의 궤적이 실제 사고의 궤적으로 회전 변환이 된 것을 확인할 수 있다. 이 때 충돌사고 실제 궤적과 실험 결과 실선 궤적 간 최대 CTE값은 $0.35L_{OA}$, CTE의 RMS 값은

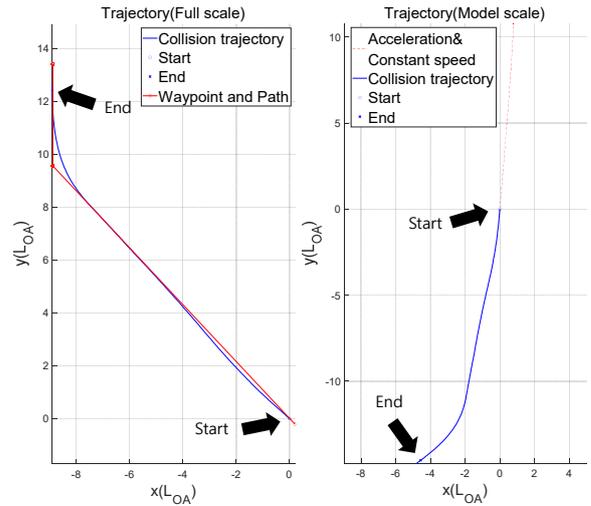


Fig. 14 Path(red line) and trajectory(blue line) for the ship A(case 1)(Left: full scale, right: model scale)

$0.11L_{OA}$ 로 충분히 작은 값으로 확인된다. Fig. 15는 모형선으로부터 Froude scale law를 활용하여 변환된 실선의 속력, 선수각, 선수각속도의 시간이력을 모형선 값과 스케일을 고려한 상태에서 비교하여 보여준다. 여기서 시간 0초 이전은 모형선의 초기상태 계측, 가속정속구간을 의미하며, 0초 이후부터 시험시간으로 표기하였다. 실선의 속력과 선수각, 각속도의 시간이력상의 값과 모형시험 결과값의 경향을 비교했을 때 동일하게 나타나 잘 변환되었음을 확인할 수 있다. 이와 같이 자유항주시험 기반의 선박 충돌 재현을 통해 실제 사고 선박의 운동 이력 정보를 추정할 수 있고, 이를 이용하여 기존에 조사한 사고 상황을 물리적으로 검증하여 충돌 당시 상황 파악에 활용할 수 있다.

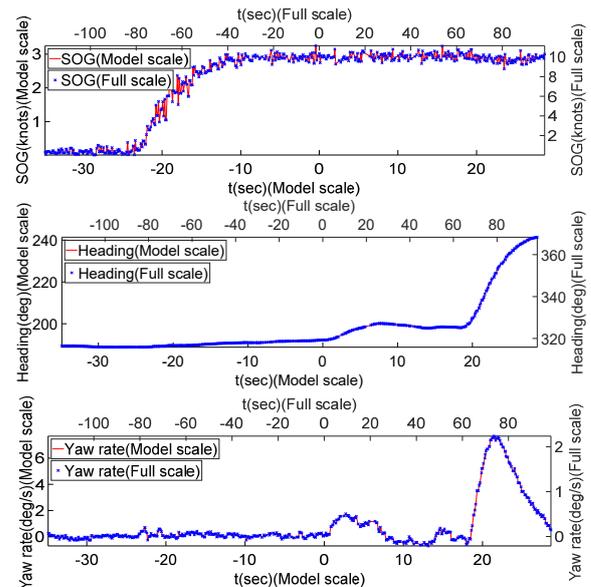


Fig. 15 SOG(Speed Over Ground)(upper), heading angle (mid) and yaw rate(lower) between model and full scale ship for the ship A(case 1)

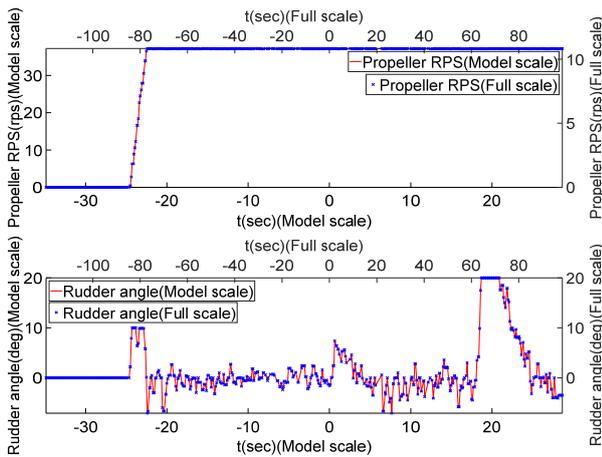


Fig. 16 Propeller rps(starboard)(above) and rudder angle(starboard)(below) between model and full scale ship for the ship A(case 1)

Fig. 16은 자유항주 모형시험을 통해 얻은 값으로부터 추정된 실선의 제어기(프로펠러 회전수, 타각) 상태값과 모형시험의 제어기 상태값을 비교한 결과를 보여준다. 마찬가지로 Froude scale law를 활용하였으며, 실선 제어기의 시간이력상의 값과 모형시험 결과값의 경향을 비교했을 때 동일하게 나타나 잘 변환되었음을 확인할 수 있다. 향후 선박충돌사고시 사고 선박의 제어기 이력이 없는 경우, 자유항주 시험 기반의 선박충돌 재현을 통하여, 실제 선박 사고 당시 제어기의 물리적 이력을 추정할 수 있음을 확인하였다.

4.2 선박충돌 사고 사례 2 시험 결과

Case 2에 대한 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현 시험 결과, 얻어진 모형선 충돌 궤적 및 이를 이용해 변환된 실선 충돌 궤적은 Fig. 17과 같다.

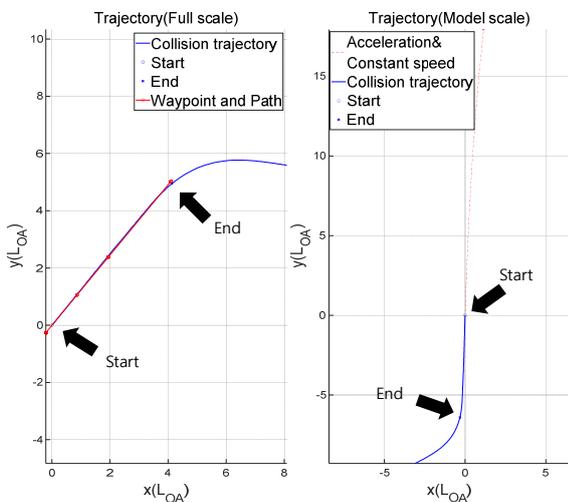


Fig. 17 Path(red line) and trajectory(blue line) for the ship C(case 2)(Left: full scale, right: model scale)

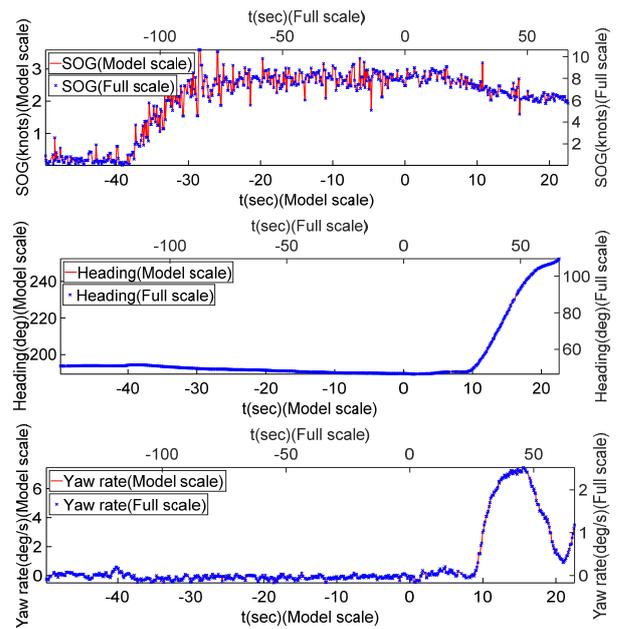


Fig. 18 SOG(Speed Over Ground)(upper), heading angle (mid) and yaw rate(lower) between model and full scale ship for the ship C(case 2)

Case 1과 마찬가지로 Fig. 17에서 보듯이, 궤적 분석을 통해 모형선의 궤적이 실제 사고의 궤적으로 회전변환이 된 것을 확인할 수 있다. 이번 시험의 경우 충돌사고 궤적이 직선에 가까운 형태를 갖고 있어 충돌사고 궤적과 실험사이의 궤적 간 최대 CTE 값은 $0.08L_{OA}$, CTE의 RMS 값은 $0.02L_{OA}$ 로 Case 1보다 더 작음을 알 수 있다. 또한 Fig. 18은 Case 1과 마찬가지로 변환된 실선의 속력, 선수각, 선수각속도의 시간이력을 모형선 값과 스케일을 고려한 상태에서 비교하여 보여준다. 모형시험의 결과값에서 실선의 속력과 선수각, 각속도로 잘 변환되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 19도 Case 1과 마찬가지로 추정된 실선의 제어기(프로

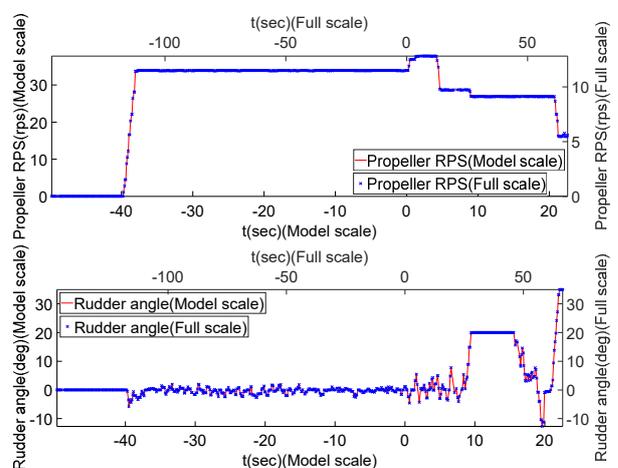


Fig. 19 Propeller rps(starboard)(above) and rudder angle (starboard)(below) between model and full scale ship for the ship C(case 2)

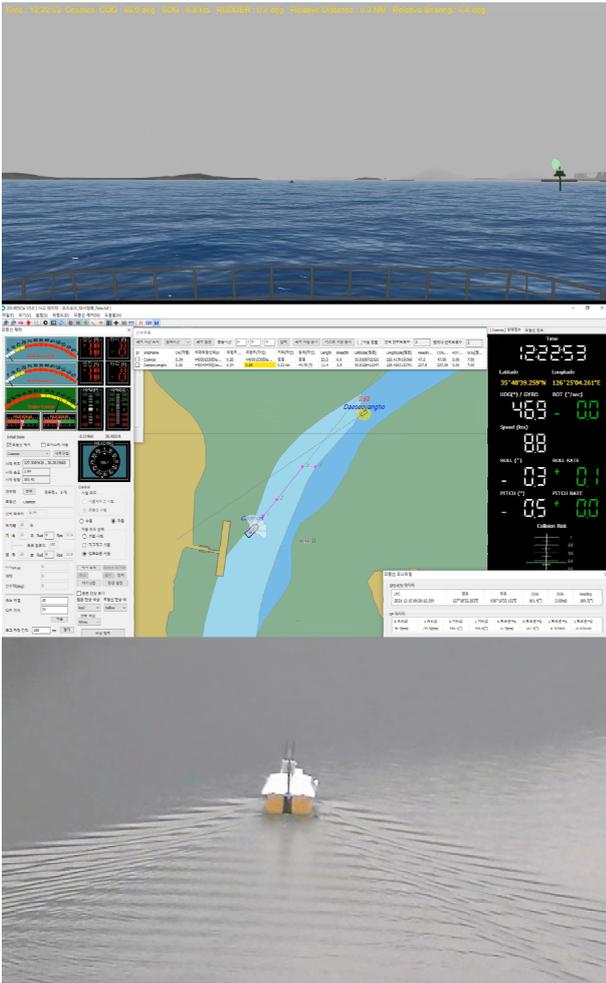


Fig. 20 3D(upper)/2D(mid) view of the RESCA and the CCTV view(lower) of free running model test at the time of 1 min before the collision during replay of collision accident(Case 2)

펠러 회전수, 타각) 상태값과 모형시험의 제어기 상태값을 비교한 결과를 보여준다. 실선 제어기의 시간이력상의 값과 모형시험 결과값의 경향을 비교했을 때 동일하게 나타나 잘 변환되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 20과 Fig. 21은 Case 2에서 각각 충돌사고 재현시작 시점과 충돌시점에서 실제 자유항주 모형시험을 촬영한 CCTV영상과 선박충돌재현시스템상의 실제 사고선박의 2차원 전자해도 표시 화면 및 3차원 화면을 보여준다. Fig. 7과 비교해볼 때 선박충돌재현 모형시험시 실제 사고가 일어난 실선 위치로 변환되어 잘 이동되어 있음을 알 수 있다. Fig.18에서 보는 바와 같이, 실선 기준 사고 약 40초전 자선(Ship C) 및 타선(Ship D)의 접근상황을 확인할 수 있으며, 이는 2차원 전자해도 및 3차원 화면상에서도 확인할 수 있다.

Fig. 21에서 보는 바와 같이, 선박충돌 사고 시점의 자선(Ship C) 및 타선(Ship D)의 충돌상황을 확인할 수 있으며, 이는 2차원 전자해도 및 3차원 화면상에서도 확인할 수 있다.



Fig. 21 3D(upper)/2D(mid) view of the RESCA and the CCTV view(lower) of free running model test at the collision time of replay of ships colliding accident(Case 2)

5. 결론

본 연구에서는 선박 충돌사고 재현을 물리적으로 재현하고 검증하기 위한 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현 시험방법과 그 시스템을 설계하고 구현하였다. 선박충돌재현 시험 시스템의 성능을 확인하기 위하여, 실제 선박충돌사고 사례 2건에 대해 자유항주 모형실험을 실시하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실제 선박충돌사고에 대한 자유항주시험을 통한 선박충돌사고를 재현시, Froude scale law를 활용한 모형선-실선 간 물리량 변환과 위치데이터의 평행이동 및 선수각 회전변환 등 선박충돌재현 시험시스템이 실시간 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다. 또한, 선박충돌사고시 사고선박의 제어기 이력의 데이터가 없는 경우, 자유항주시험을 통하여 실제 사고 당시에 사고 선박의 제어기 물리적 이력도 추정이 가능함을 확인하였다.

2) 자유항주 모형을 이용한 선박충돌재현 시험시, 시험 시스템의 정확도로서 경로추종 오차의 RMS값이 선박 충돌사고 사례 2건에서 각각 $0.11L_{OA}$, $0.02L_{OA}$ 로 매우 작게 나타나 실제 선박충돌 사고궤적을 물리적으로 충분히 잘 재현하고 있음을 확인하였다.

향후 실제 선박충돌 재현시 좀더 입체적인 분석을 위해서는 사고선박의 횡동요, 종동요 및 상하동요 등 자세 정보를 획득할 필요가 있으며, 선박충돌재현 시스템에 이를 반영하고, 자유항주 모형시험을 통해 추가 검증할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 해양경찰청 불법선박대응을 위한 장비선진화 기술 개발(R&D) 사업인 “해양 선박충돌 사고재현 및 과학적인 원인분석기술 개발”(1535000249(PMS4630), 1535000385(PMS5100)) 과제 및 과학기술정보통신부 무인이동체 원천기술 개발(R&D) 사업인 “무인수상선 및 자율운항 기술 개발”(1711137843(PNS3980), 1711196740(PNS4450)) 과제 및 선박해양플랜트연구소 주요사업인 “인공지능 기반 무인선 상황인식 및 자율운항 기술 개발”(1525012041(PES3880), 1525014863(PES4710)) 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Busan Regional Maritime Safety Tribunal, 2005. *Busan regional maritime safety tribunal judgment*, 2005-028

Cheun, D.I., 2003. *Building of a simulator for analyzing vessel collision accidents*, Master degree, Mokpo National Maritime University.

Cho, Y.H., Han, J.W., Kim, J.W., Lee, P.Y. and Park, S.B., 2019. Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles, *IFAC-PapersOnLine*, 52(21), pp.329-334.

Fossen, T.I., 2011. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons.

Incheon Regional Maritime Safety Tribunal, 2016. *Incheon regional maritime safety tribunal judgment*, 2016-038

Kim, J.R., Jong, J.Y., Im, N.K. and Kim, C.S., 2006. The marine safety judgment management system for scientific investigation and analysis of marine accidents, *Proceedings of KOSOMES biannual meeting*, KOSOMES, Tongyeong, 17-18 November 2006.

Kim, J.R., 2007. *The study on the construction of accommodation type three-dimensional simulator for reproduce marine accidents*, Master degree, Mokpo national maritime university.

Korea Maritime Safety Tribunal, 2022. *2021 Marine accident statistics report*, Government Publications Registration Number 11-1192251-000024-10.

Park, G.K., 2002. Building of a simulator for analyzing ship's collision accidents. *Journal of Korea Navigation and Port Research*, 26(3), pp.275-280.

Son, N.S. and Kim, S.Y., 2010. Validation on the algorithm of estimation of collision risk among ships based on AIS data of actual ships collision accident. *Journal of Navigation and Port Research*, 34(10), pp.727-733.

Son, N.S., 2016. On the replay simulation of ships collision accident by using VTS data, *Proceedings of Asian Navigation Conference*, Yeosu, 10-12 November, 2016.

Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO), 2017. *Development of replay system of ships' collision accident(3rd year)*, KCG-2016-03

Son, N.S. and Pyo, C.S., 2017. *On the simulation analysis of playback and avoidance of actual ships collision accident by using collision risk*, KRISO Technical Report, 58, pp.107-116.

Son, N.S., 2019. On the analysis of ships collision accident and the support for ship safe navigation by using collision risk, *Proceedings of Asian Navigation Conference*, Busan, 21-23 November, 2019.

Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering (KRISO), 2019. *Development of core technology for the analysis & reproduction of maritime accident through simulations - 2nd phase*, BSPES3100-11706-2.



박한솔

손남선

표춘선