

선체운동 해석 기반의 예인선 출항통제 적정성 평가에 대한 연구

김태훈* · 유용웅** · 이윤석*** · 안영중****

* 한국해양대학교 해양경찰학부 석사과정, ** 한국이네비정보기술 책임연구원, *** 한국해양대학교 교수

A Study on the Evaluation of the Appropriateness of the Control of Departure of Tugs Based on the Analysis of Ship Dynamic Motion

Tae-Hoon Kim* · Yong-Ung Yu** · Yun-sok Lee*** · Young-Joong Ahn****

* Master Candidate, Division of Coast Guard Studies, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

** Senior Researcher, Korea e-Navi Information Technology, Busan 49111, Korea

*** Professor, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 우리나라는 기상 악화 속에서 감항성이 확보된 선박만이 항해할 수 있도록 선박출항을 해사안전법에 근거하여 통제하고 있으나 통제 대상선박 지정에 대한 과학적 평가 결과 및 정량적 근거가 미비하여, 항행안전의 확보와 합리적 출항통제 운영을 위한 개선 의견이 제기되고 있다. 본 연구는 풍랑 주의보 발효 시 주요 통제대상 선종인 예인선의 실선계측을 통해, 현행 출항통제 기준의 적정성을 평가하고 현실성 있게 개선될 수 있도록 정량적 근거를 제시하는 것에 연구 목적이 있다. 이를 위해 예인선에 선박의 3축 운동과 선체가속도를 측정하는 Sensor를 설치하여 유의파고 3m인 해역 내에서 운항하여 선체운동 성능을 계측하였고, 계측된 수치를 내항성능 평가요소 및 한계 값 기준을 바탕으로 비교 분석하였다. 실측 선박은 톤수에 따른 현행 통제기준에서 제외되었으나, 분석 결과 Pitch 값이 Operation 기준을 넘어 항행안전에 위험성이 존재하였다. 본 연구 결과는 선박 출항통제 대상에 대한 검토와 다양한 선종 및 제원을 대표할 수 있는 추가적 실측연구가 필요함을 시사한다.

핵심용어 : 선박 출항통제, 예인선, 선체운동, 선체가속도, 3축 가속도 센서, 실선계측

Abstract : Korea controls the departure of vessels based on the Maritime Safety Act such that only ships with seaworthiness can navigate in bad weather, but scientific evaluation results and quantitative basis for the designation of ships subject to control are insufficient. Opinions for improvement are being raised for a reasonable departure control operation. The purpose of this study is to evaluate the adequacy of the current departure control standards through actual measurement of tugboats, which are the type of vessels subject to control when a wind and wave advisory is effective, and to present quantitative grounds for improvement of controls. A sensor was installed on the tugboat to measure the ship's three-axis motion and hull acceleration, and the hull motion performance was measured by operating in the sea area with a significant wave height of 3 m. The measured values were compared and analyzed based on seaworthiness evaluation factors and limit value standards. The actual ship was excluded from the current control standard according to tonnage, but as a result of the analysis, the pitch value exceeded the operation standard, and a risk to navigation safety existed. The results of this study suggest the need for additional actual measurement studies that can represent various ship types and specifications and review ship departure control targets.

Key Words : Control of Departure of Vessels, Tugs, Ship Dynamic Motion, Hull Acceleration, Three-axis Acceleration Sensors, Actual Measurement

1. 서 론

우리나라는 기상특보가 발효될 시 특정 풍속 또는 파고에서 감항성이 확보된 선박만이 출항할 수 있도록 하여 인명파

해를 보고하고자 「해사안전법」에 따라 선박 출항을 통제하고 있다(MOF, 2023). 선박 출항통제는 기상특보별로 해당하는 대상 선박을 통제하고 있으며, 일부 특수한 조건(국제항해, 항행구역, 예부선 결합선박, WIG선 등)을 제외하면 크게 선박의 총톤수와 길이에 따라 규정하고 있다. 내항여객선 및 어선을 제외한 화물선 등(예인선, 작업선, 바지선, 유조선 등 포함)

* First Author : taehoonkim@kokmc.com, 051-441-7277

† Corresponding Author : yjahn0726@kmou.ac.kr, 051-410-4235

의 경우 1970년대까지 선박의 출항을 선장의 판단에 따라 결정하였으나, 1982년 5월경 당시 해운항만청(現. 지방해양수산청)에서 해양사고의 방지를 위해 안전대책으로 기상 악화 시 출항금지 사항을 마련한 것으로 확인된다(MOF, 2021).

주요 해운 국가의 경우 기상 악화 시 선박의 감항성 확보 및 출항가능 여부에 대해서 대체로 선장의 고유 판단에 맡기거나 인명 보호를 위해 선박 중 여객선에 대해서만 통제하는 반면, 우리나라의 경우 선박의 항행구역이나 국내 총톤수 및 길이(수선장) 등에 따라 일률적으로 통제하고 있다. 다만, 「해사안전법」에 명시된 화물선 등에 대한 출항통제 기준이 과학적 평가 결과 및 정량적 근거가 미비하다는 민원이 지속적으로 발생하고 있으며, 출항통제 기준을 보다 현실성 있게 개선되어야 한다는 의견이 제기되고 있다(MOF, 2021). 반면에 선박 출항통제 기준을 수립할 당시의 해상교통환경 및 해역 환경과 현재 상황과는 차이가 있으며, 해상 고유의 위험(Perils of the seas)과 관련된 선박의 감항성이 변화하여 통제기준이 재검토되어야 한다는 의견도 제시되고 있다(MOF, 2021). 이에 따라 화물선 등의 출항통제 기준에 관한 다양한 선행연구가 수행되었으나, 현재의 출항통제 대상 선박급에 대한 평가가 미흡하고, 수치 해석적 평가만 결과로 제시되어 실제 기상 악화 시 해역 내에서 실선 계측 및 평가 필요성이 있다.

최근 5년의 기상 악화 시 발생한 국내 해양사고를 살펴보면, Fig. 1과 같이 기상특보(주의보, 경보) 중 해양사고가 지속적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 태풍 주의보·경보(Typhoon advisory and warning)와 풍랑경보(Wind and wave warning) 시 해양사고도 발생하고 있으나, 경보 수준보다 유의파고와 풍속이 낮은 풍랑 주의보(Wind and wave advisory) 중 발생한 해양사고가 가장 많았다. 이는 우선적으로 풍랑 주의보 발효 시 출항통제 기준에 대한 검토 필요성을 의미한다.

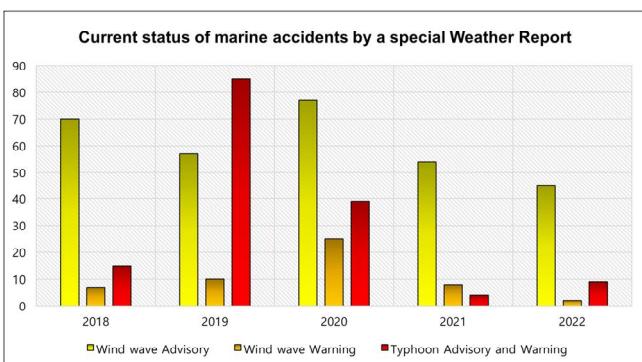


Fig. 1. Current status of marine accidents by a special weather report (2018~2022) in Republic of Korea.

이에 따라 풍랑 주의보 시 통제 선박의 현행 출항통제 기준의 적정성을 평가하고, 현실성 있게 개선될 수 있도록 실선 계측을 통해 정량적 근거를 제시하는 것에 연구 목적이 있다.

풍랑 주의보 시 어선 및 내항여객선을 제외한 출항이 통제되는 총톤수 250톤 미만인 선박(수선간장, Length between perpendiculars) 35미터 미만의 선박을 대상으로 국내 등록 선박을 조사한 결과, 예인선이 가장 높은 비율로 나타났다. 따라서 실측 선종을 예인선 대상으로, 풍랑 주의보 시 통제기준과 유사한 예인선에 선박의 3축(X, Y, Z) 운동을 측정하는 MEMS Sensor인 Ellipse를 탑재하여 실제 풍랑 주의보가 발효된 시점, 즉 유의파고 3m인 해역 내에서 운항하여 선체 운동 성능을 계측 및 분석하였다. 이후 계측된 수치를 국내외 선체 운동 성능 기준들과 비교하여 한계발생 여부를 확인하고 검토 결과를 바탕으로 풍랑 주의보 시 예인선에 대한 통제기준의 적정성 여부를 판단하기 위한 연구를 계획하였다.

2. 출항통제 기준 검토 및 관련 선행연구 조사

2.1 출항통제 기준 및 대상선박 현황

「해사안전법」에 따라 어선 및 내항여객선 외의 선박, 즉 화물선, 유조선, 예인선, 작업선, 바지선 등은 지방해양수산청장이 출항통제권자로서 해상에서 기상특보가 발표되어, 선박의 안전운항에 지장을 줄 우려가 있다고 판단되면 출항이 통제된다. 풍랑 주의보 시, 통제 대상선박에는 총톤수가 250톤 미만인 선박이 35m 미만인 선박이 통제 대상에 포함되는데, 국제항해에 종사하거나 평수구역만을 운항할 때는 그 대상에서 제외된다. Table 1은 국내에 등록된 선박 중 어선 및 내항여객선을 제외한 주의보 시 통제대상에 해당하는 250톤급 내외(100톤~500톤)의 선박을 선종별 척수로 나타낸 것이다. 해당 범위 내에서는 예인선이 가장 많은 것으로 나타났다.

Table 1. Current status of vessel between 100GT and 500GT

TYPE	100GT ≤ <250GT	250GT ≤ <500GT
General cargo	4	14
Oil tanker	190	80
Tug	388	205
Barge	98	149
Others	69	20

Fig. 2는 풍랑 주의보 시 2018년부터 2022년까지 발생한 해양사고 중 선종별로 발생 건수를 나타낸 것이다. 그중에서 통제제도의 사각지대(출항신고 미흡 등)로 인해 발생한 기타선의 해양사고 등을 제외하면 총톤수 250톤급 선박 중에서 예인선의 사고 비율이 가장 높은 것으로 나타났다.

검토 대상 범위에서의 선종별 척수와 기상특보 중 발생한 해양사고의 비율을 고려하여 본 검토에서 우선 수행 대상 선박을 예인선으로 선정하였다.

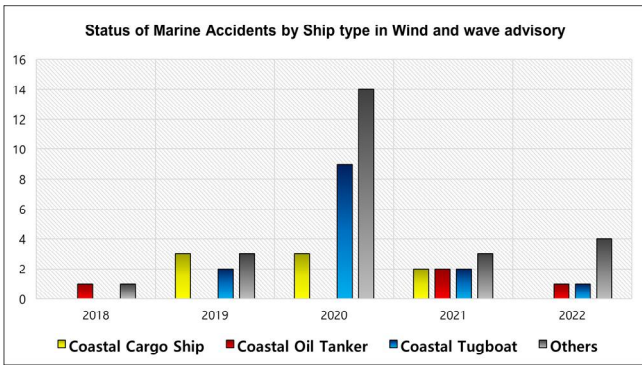


Fig. 2. Current status of marine accidents (2018~2022) by ship type in wind and wave advisory.

Fig. 3은 선박 길이별 총톤수 분포현황을 확인하기 위하여 선 및 내항여객선을 제외한 국내 등록된 선박 중 총톤수 100~500톤 사이에 해당하는 선박을 길이(수선간장)별로 나타낸 것이다. Fig. 3에는 주의보 시 통제 대상 선박을 구분하기 위하여 총톤수 250톤(세로선)과 선박길이 35m(가로선)의 기준으로, Section 1은 총톤수 250톤 이상이며 길이 35m 이상 선박, Section 2는 총톤수 250톤 미만이며 길이 35m 이상 선박, Section 3은 총톤수 250톤 미만이며 길이 35m 미만 선박, Section 4는 총톤수 250톤 이상이며 길이 35m 미만 선박들을 나타낸다. 따라서 주의보 시 통제 대상 선박들은 Section 3에 해당하는 선박들이고 선종별로는 대부분 예인선(△모양의 짙은 색상 표시)으로 확인된다. 각 Section 간의 경계에 위치한 선박들과 톤수는 250톤 미만이지만 선박길이 35m 이상으로 출항통제에서 제외되는 Section 2 영역의 선박들과 선박길이는 만족하지 않지만 250톤 이상으로 출항통제에서 제외되는 Section 4 영역의 선박에 대한 출항통제 기준 적정성 평가가 고려될 필요성이 있다.

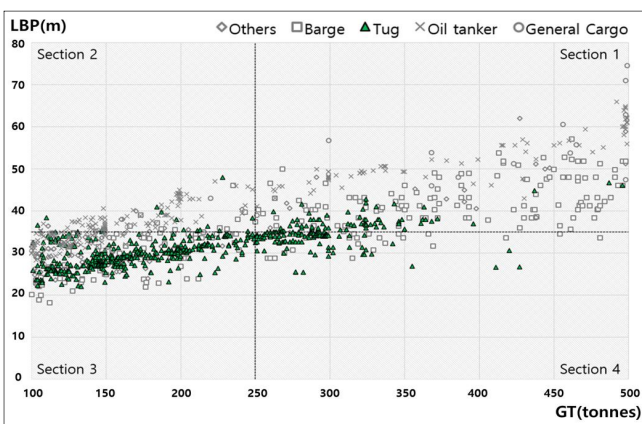


Fig. 3. Status of registered vessels in Republic of Korea by ship type (Between 100GT and 500GT).

2.2 선행연구 조사

선박 출항통제에 대한 선행연구로, 법적 제도 마련을 위한 정책 연구를 시작으로 직접적인 통제기준에 관한 제도수립과 개선을 위한 연구가 해양수산부에 의해 3차례 수행된 바 있다(MOF, 2008; MOF, 2015; MOF 2021). KSA(1990)는 최초의 선박 통제기준을 총톤수뿐만 아니라 배수량 등을 기준으로 설정할 것을 제안하였고, 각각의 선박 특성에 따라 특정 사고에서의 내항성능이 비슷한 제원에서 차이가 있음에 따라 모든 선박이 개별로 평가되는 것이 가장 이상적이나 현실성이 떨어진다는 것을 지적하였다. 이후 수행된 정책 연구에서 대체로 정책적 연구에 주안점을 두었고, 내항성능 평가는 주의보급(총톤수 250톤 및 길이 35m)에 해당하는 선박에 대한 평가만 이루어졌다. 하지만 이마저도 실제 주의보 시 통제 대상이 되는 제원과는 차이가 있었으며, 그중 예인선 1척(총톤수 169톤 및 길이 25.5m)이 평가되었으나 마찬가지로 제원에서 큰 차이가 있다.

정책 연구 이외에도 출항통제기준을 평가하기 위한 기법인 내항성능 평가를 활용한 많은 선박의 감항성 연구가 수행되었다. Kim(1987)은 종합내항성능 평가 결과치의 유효성에 대해 설명하였고, Kim and Kong(1996)은 내항성능 평가에 적용되는 한계치 평가 요소 중 한 가지 요소를 평가하여 나머지 평가 요소와의 상호 연관성을 이용한 종합 내항성능지표를 개발하였다. Kim et al.(1998)은 실시간 기상정보를 이용하여 내항성능 평가 시스템을 실용화 하는 방안을 검토하였고, 반면, Kim et al.(2003)은 내항성능 평가를 통해 여객선 중차도선에 대해 운항구역인 평수구역의 기상 현황 파악과 여객선 항로 내 실시간 기상정보 활용 및 신규항로 검토 활용 방안을 제시하였다. Kang et al.(2020)은 내항여객선이 운항하는 해역의 기상을 바탕으로 선박의 항해 안전성을 평가하기 위하여, 선체운동 실선 계측 및 내항성능을 평가하였고, 적재 화물의 고박 타당성을 제시하였다. Yi et al.(2020)은 연안에서 항해할 것으로 예상되는 48m급 LNG 벙커링 선박을 대상으로 안전운항을 위한 내항성능 평가를 위하여 해역의 환경 및 선박의 운항 조건을 고려하여 평가하였다. 실선계측에 대한 평가는 Cho et al.(2000)이 실습선박에 가속도 측정기 등을 활용한 실선계측과 가상 내항성능 평가와의 결과치 비교를 통한 실선적용 가능성 및 활용방안을 제시하였고, Jung et al.(2007)은 선체감시장치 계측 데이터를 이용하여 계측 결과와 ITTC(International Towing Tank Conference)에서 제시된 내항성능 기준 한계치와의 비교 및 검토를 수행하였다.

선행연구 조사에서 내항성능 평가를 통해 검토된 선박 중, 주의보 시 통제 대상 선박 제원급에 해당하는 선박은 거의 없었고, 특히 예인선의 경우 출항통제 기준 제원과는 크게 차이가 있어 적정성 근거 마련에는 미흡한 것으로 평가된다. 또한 대상 범위에서 평가된 선박은 모두 선박의 제원

및 도면 등을 바탕으로 수치해석적 프로그램 활용을 통한 특정 파랑 스펙트럼에 대한 평가 결과들이 주요하게 제시되었다. 하지만 실제 주의보가 발효된 해역 내에서의 실선계측을 통한 평가 연구가 없어, 이론적 평가 값과 실제 해역에서의 운동 성능 계측값 간의 비교를 통한 현장에서 적용 타당성에 대한 검토가 이루어지지 않았다.

따라서 선행연구의 한계점을 보완하기 위해 주의보 시 통제 대상이 되는 선박 중 가장 큰 비중을 차지하는 예인선에 대하여, 통제 대상 선박 제원과 가장 가까운 선박에 대하여 실제 주의보가 발효된 해역 내에서 선체 운동 계측 장비를 통한 계측 수행을 하고, 3축 가속도를 분석하여 내항성능 평가 요소에 대한 한계치 기준과 비교하여 위험성을 판단하고자 한다.

3. 선체운동해석 및 실선 계측

3.1 계측 장비

1) Ellipse-N 계측센서

실선 계측 시 가속도 측정은 Inertial Navigation System(이하 INS라 함) 기반의 SBG사의 Ellipse-N 센서로 측정하였다. INS는 Inertial Measurement Unit(이하 IMU라 함)을 이용하여 선체의 위치를 분석하며, 자이로스코프와 가속도계를 통해 선박 등 이동체의 6 자유도 운동 계측이 가능하다. 또한 자이로스코프를 통해 Roll 등의 각속도(rad/s)를 측정하고, 가속도계를 통해 3축(X, Y, Z)의 가속도(m/s²)를 계측한다.

IMU 시스템을 활용한 선박에서의 실제 항해 중 선체운동 측정에 관한 시스템의 유효성은 Kim et al.(2013)과 Lee and Lee(2019)의 연구에서 검증되었으며, 이 연구에서는 IMU를 기반으로 구성된 INS 장비인 Ellipse-N 센서를 활용하였다. Ellipse-N 센서는 자이로스코프, 가속도계, 지자기 센서의 각 3축(총 9축) IMU 기반으로 EKF(Extended Kalman Filter)를 통해 보정하는 시스템이 구축되어 있다(Jeon, 2015).

Table 2. Specification of acceleration measuring sensor

Sensor Spec.	Ellipse-N
Roll	0.05°
Pitch	0.05°
Heading	0.2°
Velocity(X, Y, Z)	0.03m/s
Heave accuracy	5cm or 5%
Heave Period	Up to 15s

Table 2는 실측에 사용된 가속도 측정 센서의 상세 사양을 나타낸다. Ellipse-N 센서의 경우 Roll, Pitch는 0.05° 단위, 3축의 가속도의 경우 0.03m/s 단위로 계측한다.

2) 선체운동 계측

이 연구에서는 X, Y, Z의 3축 가속도와 Roll, Pitch의 선체 운동을 계측하였다. IMU 센서에서 계측되는 Roll과 Pitch는 각각 X, Y 축을 기준으로 회전하는 운동이며, 자이로스코프를 통해 계측된 각속도(Roll, Pitch 등) 결과를 가속도계의 X, Y, Z 가속도와 비교 보정한다.

가속도를 통한 Roll, Pitch 공식은 다음 (1), (2)와 같다.

$$Roll = \text{atan}\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (1)$$

$$Pitch = \text{atan}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (2)$$

여기서 a_x , a_y , a_z 는 각각 X, Y, Z 축 가속도를 의미함

다만, 여기서 Yaw는 Z축을 기준으로 하는 회전운동이며, 가속도계에서 계측된 Z축 가속도는 중력에 의한 가속도가 포함되기 때문에 Roll과 Pitch와 다르게 변환 오차가 크게 발생한다.

3.2 계측 조건

1) 대상 선박 제원

해상에서의 실선 계측을 위하여 풍랑 주의보 중 출항통제 대상이 되는 선박 길이 35m 미만의 예인선을 대상 선박으로 선정하였으며, Table 3은 계측을 수행한 선박 제원 정보이다.

Table 3. General particulars of 309 CHOYANG

Item	Dimensions
Ship's name	309 CHOYANG
Gross tonnage [ton]	286
Length overall, LOA [m]	33.7
Length between perpendiculars, LBP [m]	31.47
Breadth [m]	10.6
Draught at full load [m]	4.96
Sea speed [knots]	13.0

국내 등록 예인선은 크게 항계 내에서만 운항하는 항만 예인선과 바지선을 예인하거나 단독으로 연안을 항해하여 항만 간을 오가는 연안 예인선으로 나누어진다. 항만 예인선의 경우 대체로 항계 내에서만 운항하고 있으며, 우리나라 항만의 항계는 대부분 평수구역 내에 속하고 있다. 즉 항계 내는 연안해역 대비 상대적으로 정온도가 확보되어 있어 악천후 시 운항하는 경우가 드물다. 그러나 연안 예인선의 경우 정온도가 확보된 항계 내뿐만 아니라 기상특보에 따라 파고가 높게 형성되는 해역을 운항하고 있어 상대적으로 위험성에 크게 노출되어 있다. 따라서 본 연구에서는 풍랑 주의보 시 유의파고 3m 이상 되는 해역을 운항하는 연안 예인

선체운동 해석 기반의 예인선 출항통제 적정성 평가에 대한 연구

선을 대상으로 선정하였다. 해당선박의 총톤수는 286톤으로 풍랑 주의보 시 톤수 기준으로는 통제대상이 아니다. 다만 풍랑 주의보가 발효된 환경 조건에서도 실측할 수 있도록 250톤에 가까운 선박을 대상으로 하였다.

파랑 중 선박의 횡동요, 종동요, 선수동요는 동시에 변화하기 때문에 정확한 선체 운동 계측을 위해서는 센서를 선박의 무게 중심점에 설치하여 데이터를 획득하는 것이 이상적이다. 다만 현실적으로 선박의 구조 요건상 무게 중심점에 센서를 설치하기 어렵고 실제 예선에 가장 영향을 크게 미칠 것으로 예상되는 Pitching에 대하여 항해사가 실제로 느끼는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 4와 같이 예인선 선교 중심 지점에 센서를 설치하여 계측을 수행하였다.



Fig. 4. Installation location of measuring sensor.

박에 승선하여 계측을 수행하였으며, 계측 경로는 부산 남외항 묘박지 N-1 부근에서 계측을 시작하여 감천항 입구, 나무섬 인근, 남외항 N-5 및 태종대 남단 순으로 지나 북항 입구에서 제1항로를 진입하고 난 후 계측을 종료하였다. 실선 계측은 연구 수행에 안전이 확보된 상태에서, 운항선속 약 8kts를 유지하면서 선박의 선수를 030° 간격으로 변침하면서 각 구간마다 약 5~10분간 측정하였다. 풍랑 주의보가 발표되기 직전부터 직후까지 수행하였으며, 당일 12:00에 풍랑 주의보가 발표되었고 14:00에 발효되었다. 이후 15:00에는 태풍 정보로 대치되었다.

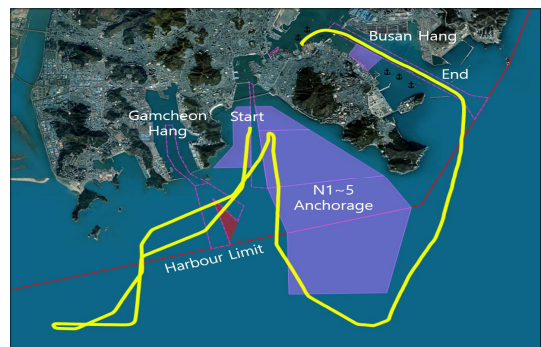


Fig. 5. Route for ship acceleration measuring.

2) 실선 계측 환경 조건

예인선을 대상으로 출항통제에 대상이 되는 풍랑 주의보에 근접한 상황에서의 실선계측을 위하여 2022년 9월 19일 제14호 태풍 ‘난마돌’의 부산 내습 하루 전 기상특보 발효 직전(풍랑 주의보)에 실선계측 하였다. 기상정보는 가장 유사한 환경이었던 거제도 기상부표의 정보를 활용하였고, Table 4는 실선계측 수행 당시 관측된 해상상태 중 파고와 파향, 파주기를 나타내었다. 당시 유의파고는 약 2m대로 측정되었으며 최대파고는 3.5m까지 형성되었다. 파주기는 약 5초였으며, 파향은 NE 계열이었다.

Table 5. Wave data during acceleration measuring

Time	Wave			Direction(deg)
	Height (m)		Period (sec)	
	$H_{1/3}$	H_{max}		
10:00	1.7	2.5	4.7	038
11:00	1.8	2.9	4.7	043
12:00	1.9	2.7	4.8	043
13:00	2.2	3.4	5.1	045
14:00	2.1	3.5	5.1	041

3) 실선 계측 경로

Fig. 5와 같이 2022년 9월 18일 10:00부터 13:30까지 대상선

4. 계측결과 분석

4.1 실선계측 결과

실선계측 중 변침 구간, 대기 구간 등에서 발생한 수치를 제외한 일정한 선수각별 Roll(°), Pitch(°), Acc.Y(m/s²) 및 Acc.Z(m/s²)의 계측 값을 산출하였다.

Fig. 6은 2022년 9월 18일 10:00부터 13:30까지 실선 계측 중에 발생한 초당 Roll(°) 값을 나타낸 것으로 선수 방향 대비 파향에 따라 차이가 있는 것을 알 수 있다.

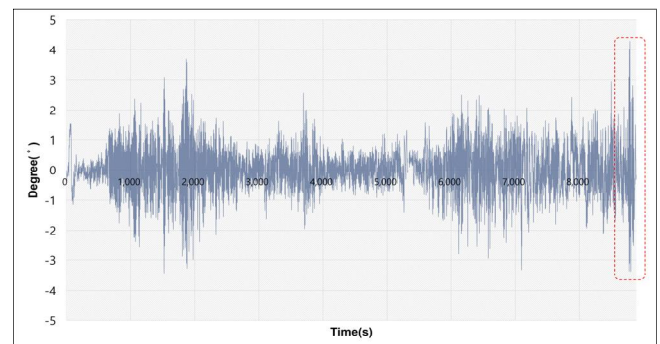


Fig. 6. Result of measuring roll raw data.

Fig. 7은 Fig. 6에서 계측값이 가장 크게 나타난 13:13 ~

13:16 사이의 구간을 확대한 것으로 당시 Heading은 300°, 파향은 045°로 선수 방향으로부터 105° 방향에서 발생한 파향에 대해 Roll 값이 최대 4.3°로 분석되었다. 당시 Roll 주기는 8초에서 9초 사이로 분석되었다.

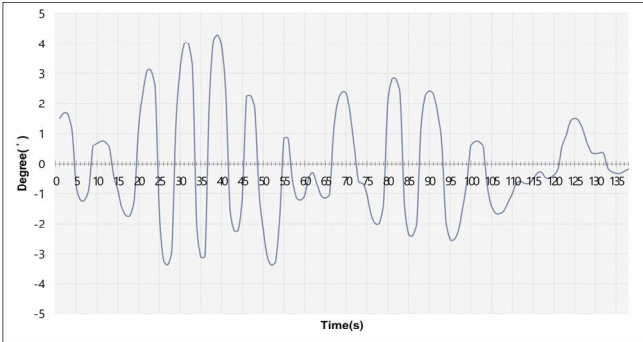


Fig. 7. Analysis of the maximum roll degree.

Fig. 8은 실선 계측 중에 발생한 초당 Pitch(°) 값을 나타낸 것으로 해상의 파고가 높을수록 값이 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8에서 계측값이 가장 크게 나타난 12:43~12:47 사이의 구간을 나타낸 것으로 당시 Heading은 030°, 파향은 043°로 선수 방향으로부터 013° 방향에서 발생한 파향에 대한 Pitch 값이 최대 5.4°, 주기는 4초에서 5초 사이로 분석되었다.

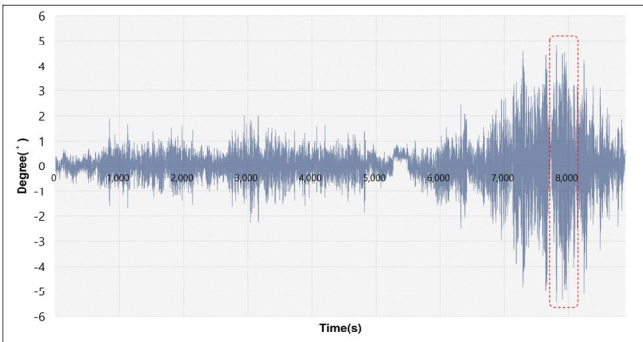


Fig. 8. Result of measuring pitch raw data.

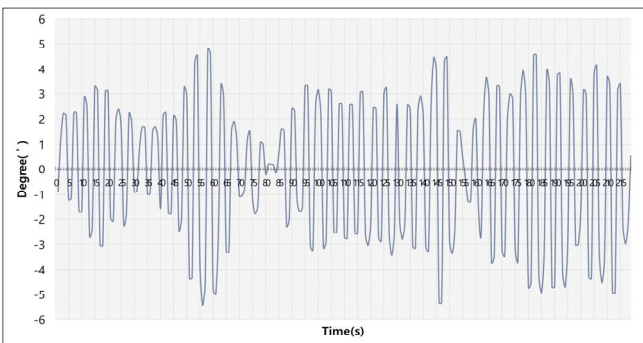


Fig. 9. Analysis of the maximum pitch degree.

Fig. 10은 2022년 9월 18일 10:00부터 13:30까지 실선 계측 중에 발생한 초당 Acc.Y(m/s²) 값을 나타낸 것으로 Roll과 연관된 요소이며 마찬가지로 파향에 따라 차이가 나타난다. 또한 해상의 파고가 높을수록 값이 커지는 것을 알 수 있다.

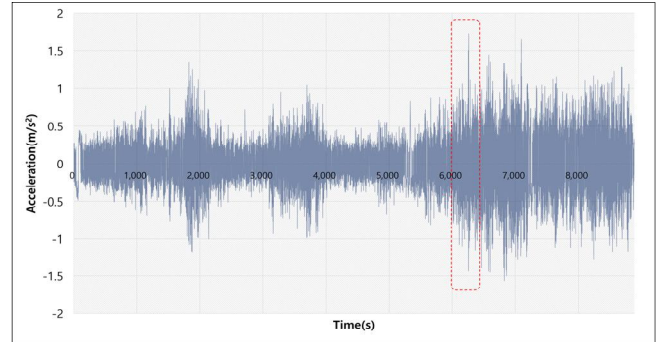


Fig. 10. Result of measuring y-axis raw data.

Fig. 11은 Fig. 10에서 계측값이 가장 크게 나타난 12:10~12:13 사이의 구간을 나타낸 것으로 당시 Heading은 150°, 파향은 043°로 선수 방향으로부터 253° 방향에서 발생한 파향에 대한 Y축 최대가속도 값이 1.7m/s²로 분석되었다. 당시 Acc.Y 주기는 5초에서 6초 사이로 분석되었다.

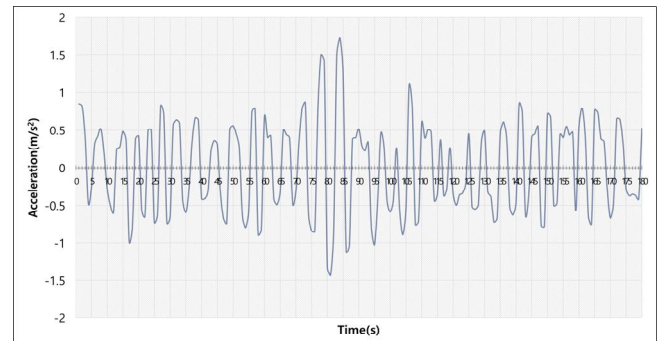


Fig. 11. Analysis of the maximum y-axis acceleration.

Fig. 12는 2022년 9월 18일 10:00부터 13:30까지 실선 계측 중에 발생한 초당 Acc.Z(m/s²) 값을 나타낸 것으로 Pitch와 연관된 요소이며 마찬가지로 해상의 파고가 높을수록 값이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12에서 계측값이 가장 크게 나타난 12:43~12:47 사이의 구간을 나타낸 것으로 당시 Heading은 030°, 파향은 043°로 선수 방향으로부터 013° 방향에서 발생한 파향에 대한 Z축 최대가속도 값이 3.5m/s²로 분석되었다. 당시 Acc.Z 주기는 4초에서 5초 사이로 분석되었다.

이때 최대치가 발생하는 시점, Heading, 주기는 Pitch와 동일한 것으로 나타났다.

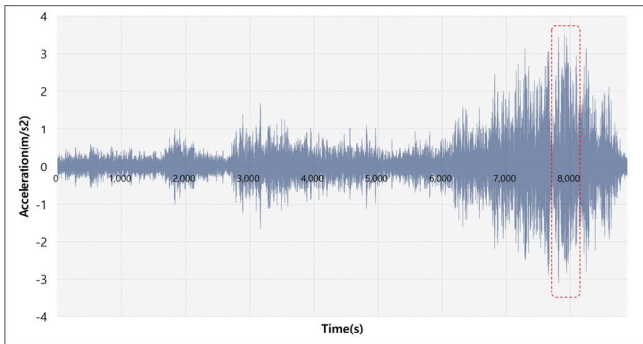


Fig. 12. Result of measuring z-axis raw data.

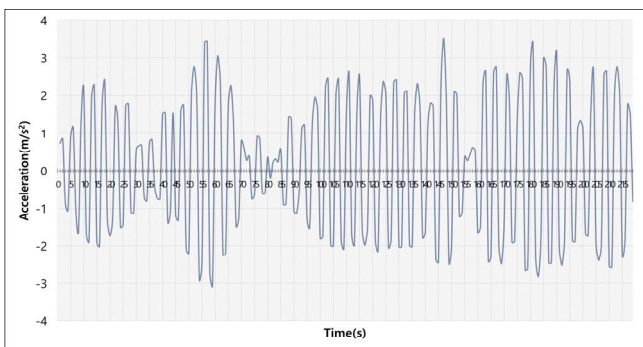


Fig. 13. Analysis of the maximum z-axis acceleration.

4.2 내항성능 분석

풍랑 주의보 시 총톤수 250톤급 선박 중 예인선에 대한 감항성능을 분석하여 출항 가능 여부를 판단하기 위해서 내항성능 평가 요소 및 한계 값 기준을 바탕으로 검토하였다. Table 5는 이 연구에서 적용한 내항성 평가를 위한 선체운동 항목 및 각각의 기준값이며, ROKN(2004)과 Nordforsk(1987)에서 제시하고 있는 내항 성능 평가 기준을 적용하였고, 국제적인 내항성 평가 기준이다(Jamal et al., 2020). 해군 함정의 안전한 운용뿐만 아니라, 일반적인 선박, 여객선 등을 포함하여 기준이 제시되었으며, 선체운동에 기반하여, 항해가 가능한 한계 기준(Survival)과 항해 중 특정한 작업이 가능한 상황(Operation)으로 세분화 되어 기준에 마련되어 있다. Operation 기준의 경우 작업 유형에 따라 여객 운송에서 가벼운 작업까지 5단계로 구분되어있으며, 예인선이라는 특성을 고려하여 위험작업 가능 기준을 적용하였다.

Table 5. Seakeeping criteria and results of actual ship measurement

Motion response	Unit	Criteria level		Results of seakeeping
		Operation	Survival	
Roll	Deg	8.0	30.0	4.3
Pitch	Deg	4.8	8.0	5.4
Acc.Y	m/s ²	2.0	3.9	1.7
Acc.Z	m/s ²	3.9	7.8	3.5

대상선박인 예인선의 출항통제 기준의 적정성을 풍랑 주의보 발효 전후에 대한 선체운동 실선 계측 결과 중 내항성 평가 항목인 Roll, Pitch와 Y, Z축 가속도를 기준으로 검토하였다.

Table 6. Seakeeping criteria and results of actual ship measurement

Motion response	Unit	Criteria level		Results of seakeeping
		Operation	Survival	
Roll	Deg	8.0	30.0	4.3
Pitch	Deg	4.8	8.0	5.4
Acc.Y	m/s ²	2.0	3.9	1.7
Acc.Z	m/s ²	3.9	7.8	3.5

Table 5에서 제시된 평가요소와 Operation/Survival 한계 값을 Table 6과 같이 실선 계측 결과와 비교한 결과, 풍랑 주의보가 발효되기 직전(12시 발표, 14시 발효)인 유의파고 2m, 최대파고 3m 이상인 해역에서 Roll, Pitch, Acc.Y 및 Acc.Z 중 Pitch 값만 Operation 기준을 넘은 것으로 나타났다. 횡동요에 의한 전복 등 실제 선박에서 사고 발생 위험에 크게 연관된 Roll 값은 상대적으로 기준 대비 낮게 나타났다. 이는 예인선의 운동 특성상 선박의 길이 대비 선평이 커 Roll이 크게 발생할 확률이 낮고, 파주기에 대한 응답이 적은 것으로 판단된다.

Roll 요소와 관련된 Acc.Y는 Operation 기준치인 2.0m/s²에 가까운 최대 1.7m/s²로 나타났는데 기준치 대비 차이는 Roll 보다 낮은 것으로 확인되었다. Acc.Y는 파주기가 길어질수록 같은 파향대비 수치가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

Pitch의 경우 최대 5.4°로 나타났는데 Operation 기준값인 4.8°를 넘으며 Survival 기준값인 8.0°에는 미치지 못한 것으로 나타났다. Pitch의 경우 횡동요에 의한 전복 가능성과 관련된 Roll에 비해 사고 발생 위험도에서는 상대적으로 중요도가 낮으나, 갑판작업, 선원의 심리적 부담감, 피로도 등과 관련되어 있다. 특히 소형선박의 선교는 대체적으로 낮으며 Pitch에 의해 선교에서 보이는 시야가 바다만 보일 경우, 선원의 운항 부담감이 매우 커질 수 있다. 실측 과정에서 Pitch로 인한 운항부담감이 매우 컸으며, 선박 조종에 어려움이 존재하였다. 또한 Pitch의 주기가 4초에서 5초 사이로 Roll 주기인 8초에서 9초보다 짧아, 운항자 입장에서의 부담감이 가중되었다. 즉, 내항성능 한계 기준에 따라 제시된 Operation 기준인 4.8°를 넘어가면 실제로도 운항에 어려움이 존재하므로, 풍랑 주의보 시 출항을 통제하여 인적 및 물적 자원보호가 필요한 것으로 평가된다. Pitch 요소와 관련된 Acc.Z의 경우 최대값이 3.5m/s²로 나타나 Operation 기준값인 3.9m/s²를 넘지는 않았으나 근사치에 해당하는 것으로 나타났다.

결론적으로 내항성능 평가 요소는 각각의 요소가 운동 성능에 연관이 되어 있더라도 내항성능 자체의 확보 여부는 각각의 개별요소에 대한 평가가 필요할 것으로 분석된다. 즉, 어느 하나라도 한계 값을 넘어갈 시에는 그 선박의 내항성능이 확보되지 않은 것으로 볼 때, 풍랑 주의보 시 총톤수 250톤급인 예인선은 그 안전성이 확보되지 않아 출항통제가 되는 것이 적정하다. 특히나 본 평가는 실제 풍랑 주의보 발효 직전 해상에서 유의과고 2m, 최대과고 3m 수준에서 수행된 결과임에 따라, 실제 풍랑 주의보 시 유의과고인 3m 이상일 경우 결과값이 더욱 크게 계측될 것으로 예상된다.

5. 결론

우리나라는 선원, 여객, 선박 및 화물 등을 보호하고 항만을 효율적으로 운용하기 위하여 특정 기상특보에서 선박의 출항을 통제하고 있다. 하지만 선박의 감항성능 향상과 해상상태의 변화 등으로 이러한 통제를 완화해야 한다는 주장과 안전 사각지대에서 해양사고가 지속적으로 발생하여 통제를 강화해야 한다는 주장이 대립하고 있다. 특히 해양사고가 많이 발생하는 풍랑 주의보가 발효된 해역에서 통제가 되는 소형선박은 대부분 예인선임에도 불구하고 대상 선박에 대한 평가는 미흡하다. 또한 일부 실시된 평가조차 모두 특정 파랑 스펙트럼에 대한 수치 해석적 평가 프로그램을 통해서만 이루어져 실해역에서의 적용성에 대한 실제적 평가가 필요하다. 이에 따라 본 연구는 현행 출항통제 기준의 적정성을 평가하고 현실성 있게 개선될 수 있도록 정량적 근거를 제시하기 위해 수행되었다.

연구방법으로 풍랑 주의보 시 통제 대상이 되는 예인선 중 연안을 운항하는 선박에 대해서 풍랑 주의보가 발효되기 직전 실해역에서 계측장비를 통한 내항성능을 평가하고, 출항통제 적정성 여부를 판단하였다. 대상 선박은 현행법상에 내항여객선(어선 포함)을 제외한 선박을 대상으로 하는 선박 중 총톤수 250톤 미만으로서 길이 35미터 미만의 내항선박에 가장 높은 비중을 차지하는 예인선을 선정하였다. 실제 실선계측을 수행한 예인선은 총톤수 286톤 및 길이 31.47m로 현행 기준 중 길이 기준만이 통제 대상에 해당되며, 두 요소 모두 충족한 선박만 통제 대상이 되는 현행 기준에서는 제외된다. 다만, 현행 통제기준에 매우 근접한 제원의 예인선을 대상으로 하였으며, 통제기준에 매우 근접하나 제외된 예인선을 대상으로 평가하여 풍랑 주의보에 근접한 실해역에서 항해 중 내항성 기준 적정성을 평가하였다.

실해역에서 약 1시간 30분 간 운항선속 약 8kts를 유지하고 선박의 선수를 030° 간격으로 변침하면서 각 구간마다 약 5~10분간 측정하였고 해역 인근 기상부이 관측 데

이터를 수집하였다. 계측 결과 실선 계측 기간 중 내항성능 평가 요소의 최대값은 Roll 4.3°, Pitch 5.4°, Acc.Y 1.7m/s², Acc.Z 3.5m/s²로 분석되었다. 측정된 결과값을 대한민국 해군, NORDFORSK 및 NATO(2000)의 내항성능 한계기준과 비교한 결과 Pitch 값이 Operation 기준을 넘어서는 것으로 확인되었다. 실제 당시 운항 중 선박 운항자가 운항 중 위험성에 대한 부담감이 크게 증가하여 어려움이 존재하였고 갑판작업은 불가능하였다.

풍랑 주의보 시 출항통제 기준에 대상이 되는 250톤급 선박 대비 총톤수가 36톤 정도 대형인 예인선에 대하여 내항성 평가 결과, 일부('Acc.Y' 및 'Acc.Z') 요소가 한계 기준값이 근접하였고 일부('Pitch') 요소는 한계 기준을 초과하는 등 현행 풍랑 주의보 단계에서도 운항 한계에 근접하거나 초과하는 등 내항성이 만족하지 못하는 것으로 평가되었다.

즉, 현행 출항통제의 총톤수 250톤 대비 286톤으로 기준을 초과하는 예인선임에도 내항성 기준을 충족하지 않음에 따라 출항통제기준 개선의 필요성을 도출하였다. 단, 연구 대상 선박은 예인선 1척만을 대상으로 하였고, 총톤수 286톤급으로 기준에서 다소 벗어난 결과로 실제 출항통제 기준의 정량적인 개선을 위해서는 보다 다양한 선종과 톤급에 대하여 실선계측을 수행하여야 한다.

결론적으로 연구결과에 따라 현재의 풍랑 주의보 출항통제 기준이 유의과고 3m 이상을 항행하는 연안 예인선의 안전성에 대해 검토가 필요한 것을 확인하였고, 실측결과를 이용한 정량적 평가 결과는 선박 출항통제 기준에 대한 개선을 위한 중요한 기초 자료가 될 수 있을 것이다. 또한 예인선의 실선계측을 통하여 내항여객선(어선 포함)을 제외한 선박 중 풍랑·폭풍해일 주의보 기상상태에 대한 출항통제기준의 개선 필요성이 제시되었으며, 현행 총톤수와 길이 기준에 대하여 기준의 상향 또는 하나의 기준으로 통일화, 선종별 세분화 등의 개선 필요성을 도출하였다. 따라서 출항통제기준의 개선 필요성 관련 자료로 활용될 수 있고, 보다 다양한 선박(선종, 규모, 길이 등)의 실선계측을 위한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구는 실측 결과를 바탕으로 풍랑·해일 주의보에 대한 출항통제 기준의 개선을 위해 보다 다양한 톤급(250, 300, 350톤 등), 선박길이(30, 35, 40m 등), 선종(예인선, 급유선 등), 기상상황(유의과고 2, 3, 4m)에 대한 실선계측 및 추가적인 내항성 평가 비교를 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2022학년도 한국해양대학교 신진교수 정착연구지원사업 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Cho, I. S., C. R. Lee, and S. K. Kim(2000), A Basic Study for the Development of Integrated Seakeeping Performance Evaluation System on board the Ship, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 103-111.
- [2] Jamal, A. Sulisetyono and W. D. Aryawan(2020), Review of the Seakeeping Criteria for the Study of a Passenger Ship criteria in Indonesian Water, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 982, Issue: 1, pp. 1-10.
- [3] Jeon, Y. H.(2015), Extended Kalman Filtering for I.M.U. using MEMs Sensors, *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol 10, No. 4, pp. 469-475.
- [4] Jung, C. H., H. K. Lee, and Y. S. Lee(2007), A Study on the Ship's Performance of T.S. HANBADA(I) The Evaluation of Seakeeping Performance by HMS Measuring Data, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 905-910.
- [5] Kang, B. S., C. H. Jung, and D. B. Kim(2020), A Study on Lashing Standards for Car Ferry Ships Sailing in Smooth Sea Areas, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-7.
- [6] Kim, C. S., C. H. Jeong, S. K. Kim, G. Y. Kong, D. I. Seol, and Y. S. Lee(2003), Evaluation of the Ship's Navigational Safety Using Dangerousness on the Korean Coast, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 9, No. 1, pp. 41-50.
- [7] Kim, D. H., S. M. Lee, and G. Y. Kong(2013), A Study on the Wireless Ship Motion Measurement System Using AHRS, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 575-580.
- [8] Kim, S. K.(1987), The Evaluation of Seakeeping Performance of a Ship in Waves, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 67-91.
- [9] Kim, S. K. and G. Y. Kong(1996), A Study of the Integrated Seakeeping Performance Index in Seaways, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 1997, No. 1, pp. 5-16.
- [10] Kim, S. K., S. M. Lee, and C. R. Lee(1998), A Study on the Evaluation of Synthetic Seakeeping Performance of a Ship Using Real Time Weather Data, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 23-32.
- [11] KSA(1990), A Study on the Safety Evaluation for Improvement of Standards for the Control of Departure of Vessels, Korea Shipping Association.
- [12] Lee, H. J. and W. T. Lee(2019), AHRS Development with MEMS and using 6-Axes Motion, *The Society for Aerospace System Engineering 2019 Spring Conference*, pp. 1-4.
- [13] MOF(2008), A Study of Standards for the Control of Departure of Vessels, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [14] MOF(2015), A Study on the Improvement Plan for the Control of Departure of Vessels, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [15] MOF(2021), A Review Study of the Standards for the Control of Departure of Cargo Ships(1st), Ministry of Oceans and Fisheries.
- [16] MOF(2023), Maritime Safety Act Retrieved from <http://www.mof.go.kr/> on Jan, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [17] NATO(2000), Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process, STANAG 4154, 3rd Ed., North Atlantic Treaty Organization.
- [18] NORDFORSK(1987), Assessment of Ship Performance in a Seaway, Nordic Cooperative Project : Seakeeping Performance of Ships, Copenhagen, Denmark.
- [19] ROKN(2004), Naval-ship Design & Construction Criteria : Guideline for Seakeeping, Republic of Korea Navy.
- [20] Yi, M. A., J. B. Park, and C. H. Lee(2020), Performance Assessment of Navigation Seakeeping for Coastal Liquefied-Natural-Gas Bunkering Ship, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 7, pp. 904-914.

Received : 2023. 04. 05.

Revised : 2023. 06. 02.

Accepted : 2023. 06. 27.