

연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 내항성능 평가에 대한 연구

이민아* · 박준범** · 이창희***

* 한국해양대학교 항해학과 석사과정, ** 한국해양대학교 항해학부 교수, *** 한국해양대학교 해사글로벌학부 교수

Performance Assessment of Navigation Seakeeping
for Coastal Liquefied-Natural-Gas Bunkering Ship

Minah Yi* · Jun-Bum Park** · Chang-Hee Lee***

* Master Candidate, Division of Navigation Science, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

** Professor, Division of Navigation Science, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

*** Professor, Division of Global Maritime, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

요 약 : 우리나라는 산업통상자원부를 통해 ‘LNG 병커링(연료공급) 전용선 건조지원사업’을 한국가스공사를 중심으로 추진하고 있고, 동시 해양수산부는 부산신항내 LNG 병커링 터미널 구축을 추진하고 있다. LNG 병커링 전용선박은 LNG 연료를 터미널에서 대상 선박으로 공급하기 위한 필수 대상이고, 이에 따라 안정 운항에 대한 절차서의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 운항 절차서를 제안하기 위하여 부산 신항에서 부산항 정박지로 운항하는 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 안정성을 평가하였다. 이를 위해 포텐셜 유동해석 기반의 운동해석을 수행하여 취득한 선체운동 응답진폭합수를 운항 해역의 5년간 관측된 실패역 자료와 부산 연안에 적합한 TMA스펙트럼과 합성하여 유의과고별 연안선박용 LNG 병커링 전용 선박의 내항성능 평가를 수행하였다. 그 결과는 유의과고 2m 이상에서 횡동요와 수평가속도가 내항성능에 주요 위험 요소가 됨을 알 수 있었다. LNG 병커링 전용선박의 운항 가능 기간은 총 관측기간의 83.3~99.9% 수준임을 알 수 있었다.

핵심용어 : LNG 병커링 전용선박, TMA 스펙트럼, 유의과고, 선체운동 응답진폭합수, 내항성능 평가

Abstract : Through the Ministry of Trade, Industry, and Energy, South Korea is trying to support the "Building Project for Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Ship," centered on the Korea Gas Corporation, while the Ministry of Maritime Affairs and Fisheries is pushing to construct an LNG bunkering terminal at Busan New Port. LNG bunkering ships are essential for supplying LNG fuel from the terminal to the ships, resulting in the need for safety operation procedures. Therefore, in this study, the stability of a coastal LNG bunkering ship operating from Busan New Port to the anchorage in Busan Port was assessed to investigate the need for operational procedures for coastal LNG bunkering ships. Seakeeping analysis of the LNG bunkering ship was performed for each significant wave height by combining the response amplitude operator from the ship motion analysis under the potential flow theory with the actual observed sea data for five years and Texel, Marsen, and Arsloe (TMA) spectrum suitable for the Busan coast. The results showed that the roll and horizontal acceleration were the main risks that affected the navigation seakeeping performance above a significance wave height of 2 m. The operational periods of the LNG bunkering ship ranged from 83.3% to 99.9% of the total observation period.

Key Words : LNG bunkering ship, TMA wave spectrum, Significant wave height, Ship motion RAO, Seakeeping performance

1. 서 론

1.1 연구의 배경

국제해사기구(International marine organization, IMO)는 2020년 1월부터 선박에서 기인한 황산화물(Sulphur Oxides, SOx)

에 대한 규제를 대폭 강화하고 있다. 따라서 국제항해에 종사하는 모든 선박은 황 함유량 0.5% m/m 이하의 선박 연료유로 전환하여 운항하여야 한다. 향후 글로벌 해운산업은 선박기인 황산화물, 질소 산화물(Nitrogen Oxides, NOx), 이산화탄소, 미세먼지 등과 같은 대기오염물질의 심각성을 인식하고, 관련 규제를 준비해야 한다(IMO(2018), Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships: Resolution

* First Author : lma7741@gmail.com

† Corresponding Author : jbpark@kmo.ac.kr 051-410-4233

Mepc.304(72), London: IMO).

국제해상운송 서비스를 제공하는 해운회사는 글로벌 선박기인 대기오염 규제에 대응하기 위하여 저유황유(Low sulphur fuel oil, LSFO), 선박용 경유(Marine gas oil, MGO), 스크러버(Scrubber)의 설치 또는 LNG 연료 사용 등을 선택하여 추진하고 있다. 그러나 해운회사는 기존 선박의 디젤 엔진 연료인 중유(Fuel oil, FO)와 MGO의 사용만으로는 선박운항 중 대기오염물질의 발생 및 배출 자체를 줄이는 것에 기술적, 비용적 한계가 있다 (Balcombe et al., 2019). 따라서 해운회사는 지속적으로 강화되고 있는 선박기인 환경규제를 준수함과 동시에 저비용 고효율의 LNG 연료가 새로운 선박연료유의 대안으로 등장함에 따라 이를 대비하는 안전운항관리 절차의 수립을 준비하고 있다. 대표적으로 우리나라는 2016년부터 정부차원에서 LNG 병커링 사업을 본격적으로 시작하여 2019년에 에이치라인해운과 현대삼호중공업은 18만톤급 LNG 연료추진선 2척에 대한 건조계약을 체결하였다. 그리고 2020년 선박해양플랜트연구소는 트랜스가스솔루션, 포스코, EK중공업(주), 마이텍, 발맥스기술, 서울라인, 한국선급 등과 기술협력을 통해 ‘연안선박용 LNG 병커링 전용선박’을 건조하고 있으며, 부산 신항, 보령, 영일만, 울산항 등에서 LNG 병커링 터미널 건설 및 관련 타당성 등을 국내외 기업들과 연구하고 있다.

1.2 선행연구 검토

연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 안정성에 관한 연구는 다음과 같다. Oh et al.(2019)은 STS(Ship-to-ship) 병커링 실증을 목표로 추진력이 없는 LNG 병커링 부선이 예인될 때 정수 중 예인안정성을 평가하였으며, Lee et al.(2018)은 2종류의 부유식 LNG 병커링 터미널의 STS 운영 적합도를 평가하기 위해서 선박과 부유식 터미널이 로딩암>Loading arm)에 연결된 상태에서 유의과고 변화에 대한 운동해석을 수행하여 STS 운영에 적합한 LNG 터미널 모델을 평가하였다. 이처럼 STS 방식으로 LNG 연료공급을 보편화시키기 위한 안정성 검증에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 또한 연안선박용 LNG 병커링과 관련하여 해당 선박의 운항 안정성에 대한 내항성능 평가의 필요성은 점차 확대되고 있다. 이와 관련한 선박의 내항성능 평가에 관한 연구로 국내에서는 Kim and Kong(1997)이 내항성능 평가요소의 한계치와 한계 발생확률을 자연적 감속을 고려한 선속에서 상하가속도 한계의 요소만을 계측하여 선종별로 종합내항성능지표를 이용하여 평가하였으며, Kim et al.(2003)은 여객선들을 대상으로 운항해역의 기상 데이터를 수집하여 내항성능요소들의 위험도를 이용하여 선박 전체의 항해 안정성을 평가하였다.

또한 Kim et al.(2019)은 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 포텐셜 유동 해석(potential flow analysis)을 이용한 하이브리드 방식의 고속 활주정 내항성능을 평가하는 절차를 개발하였다. 국외연구로 Senjanovic et al.(1997)은 불규칙과에서 거동하는 선박의 횡동요 운동을 시간 영역과 주파수 영역에서 해석하여 선박의 안정성을 평가하였으며, Tello et al.(2011)은 다양한 어선들에 대하여 주어진 해상상태에서 다양한 선속과 파의 조우각에 대하여 내항성능지표를 만족하는지 검토하였다. Ghaemi and Olszewski(2017)은 과거의 내항성능 평가 연구에 대한 분석과 함께 선박 위에서 발생하는 크레인, 화물작업과 같은 선박의 하부 시스템 작동의 상호작용을 고려하여 선박의 전체적인 내항성능과 운영가능성(operability)을 평가하는 다중 알고리즘을 제안하였다.

일반적으로 상선의 내항성능 평가는 수심, 해상 상태 그리고 파랑 스펙트럼 등과 같은 해상조건이 복대상양을 기준에 따른 절차로 수행되지만(ABS, 2005), 연안선박용 LNG 병커링 전용선박은 연안항로를 따라 운항하기 때문에 앞서 언급한 기준과 다른 관점에서 안정성을 검증할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

1.3 연구의 목적

현재 LNG 공급방식 중 소형선박, 연안여객선 등을 중심으로 Truck-to-ship(TTS)방식을 사용하고 있지만 연료공급 속도가 느리고, 육상 안벽에 3대 이상의 트럭이 배치되어야 하는 측면을 고려할 때 국제항해에 종사하는 상선에 이 방식을 적용하는 것은 상당한 한계가 있다. 따라서 대안으로 Pipe-to-ship(PTS)방식과 Ship-to-ship(STS)방식이 고려될 수 있다. PTS방식의 경우 보온·보냉용 배관설치 등과 관련하여 특정 항구에 선박이 기항하여야 하므로 선박이 연료를 공급받을 수 있는 장소적 제한이 발생하게 된다. 그리고 STS방식은 TTS방식과 PTS방식이 갖고 있는 단점을 보완할 수 있지만 다른 선박과의 안전한 이격거리 확보, 항주파에 따른 계류 안전성 등과 관련한 상황별 안정성 검증이 필요하다.

따라서 이 연구는 STS방식으로 운영될 연안선박용 LNG 병커링 전용선박이 향후 부산 신항 LNG 터미널↔부산항 정박지를 운항할 것을 가정하고, 연안항해를 할 때 운항 구간의 해상 상태에 따른 선박의 내항성능을 정량적으로 평가하고자 한다. 선박운동 계산은 주파수 영역에서 유한수심 기반으로 포텐셜 유동 운동해석을 수행하였으며, 부산 해역의 실측 파고 자료와 부산항 인근의 천수역에 적합한 TMA 파랑 스펙트럼을 적용하여 선박의 내항성능 평가를 수행하였다. 이를 통하여 안전한 운항을 위한 유의과고 한계치와 선박의 운항 가능 기간을 구체화하였다.

2. 대상 선박 및 운동해석 환경 조건

2.1 대상 선박

이 연구에서 사용된 연안선박용 LNG 벙커링 전용선박의 주요제원 및 LNG 화물창 형식은 Table 1과 같으며, Fig. 1은 대상 선박에 대한 측면 배치도로 IMO Type-C LNG 화물창이 선체 중앙부 길이에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

대상 선박의 운항은 만재 상태로 부산 신항 LNG 터미널에서 출항하며 목적항인 부산항 정박지로 이동하여 LNG를 공급하고, 다시 공선 상태로 부산 신항 LNG 터미널로 회항한다.

Table 1. Main particulars of LNG bunkering ship

Ship Particulars	Displacement	1084.4 ton
	LOA	48.50 m
	LBP	45.65 m
	Beam	12.40 m
	Depth	4.50 m
	Draft(S)	2.50 m
	LNG Cargo Tank	Tank Type
Volume		500 m ³
Service Speed		8 knots

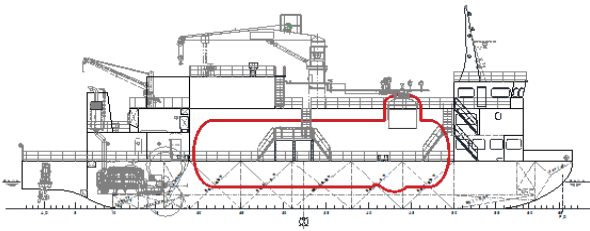


Fig. 1. Profile view of LNG bunkering ship.

따라서 연안선박용 LNG 벙커링 전용선박의 내항성능 평가를 위한 적재조건(Loading Condition)은 만재 조건(Full Load Condition)과 평형수 적재조건(Ballast Condition)을 Table 2와 같이 지정하여 내항성능 평가를 수행하였다. 또한 Table 2는 개별 적재 조건에서 해당 선박의 배수량과 흘수를 표시한 것이며, LNG 연료의 비중이 해수보다 작기 때문에 공선 상태인 평형수 적재조건이 만재 조건보다 배수량이 큰 것이 특징이다.

Table 2. Loading conditions of LNG bunkering ship

Item		Full load	Ballast
Displacement		986.9 ton	1051 ton
Draft	Fore	2.25 m	2.08 m
	Mid	2.32 m	2.41 m
	Aft	2.39 m	2.74 m
Trim		0.14 m	0.66 m
Longitudinal center of gravity (from aft perpendicular)		22.294 m	21.23 m
Vertical center of gravity (from keel)		4.59 m	3.74 m
Metacentric height (GM)		2.28 m	3.59 m

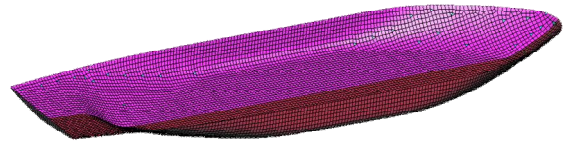


Fig. 2. Hull 3D panel of below waterline of full load condition.

Table 3. Mesh particulars of 3D hull panel below waterline

Mesh particulars		Full load	Ballast
Number of elements	Quad	7632	3965
	Triangle	32	29
Number of nodes		7824	4100

운동해석을 수행하기 위해 3차원 Panel method를 사용하였다. Fig. 2는 Table 2의 만재 조건에 대한 해당 선박의 수면 하부 패널 모델을 보여주고 있으며, Table 3은 각 적재조건에 대한 패널의 제원을 보여주고 있다.

2.2 운동해석 조건

운동해석 조건은 Table 4와 같으며, 해당 파 조우각과 파 주파수 간격은 ABS(American Bureau of Shipping)선급의 Guidance notes on 'Safe hull-Dynamic Loading Approach' for Container Carriers(2005)에 근거하였다.

Table 4. Analysis Condition

Loading Condition	Full load	Ballast load
Ship speed (knot)	4, 6, 8	
Wave heading (degree)	0-180 (increment 15)	
Wave frequency (rad/sec)	0.2-1.8 (increment 0.05)	
Roll radius of gyration(k_r)	0.35B	0.45B
Roll damping Coefficient	5%, 10%	
Water depth	30 m	

선속은 선박이 항내를 벗어나는 시점의 속도인 4노트부터 운항속도 8노트까지의 속도를 고려하였고, 전체 횡동요 회전반경은 화물 적재조건에 따라 Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers(2017)에 만재 조건 및 평형수 적재조건의 유조선 횡동요 회전반경 값을 참고하였다(Korean register of shipping, 2017). 포텐셜 기반의 운동해석시 고려해야 하는 횡동요 감쇠 계수(Roll Damping Coefficient)는 비선형 값이나 통상적인 선박에 적용되는 범위로 감쇠 계수 5%와 10%를 적용 하였다.

2.3 대상 해역 및 파랑 스펙트럼

일반 상선에서의 운동해석은 운항수심을 무한수심(Infinite depth)으로 가정하여 수행하나, 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 경우는 연안항해의 특성상 수심이 상대적으로 낮아 천수효과가 발생하기 때문에 유한수심(Finite depth)을 적용하여 수행하였다. 따라서 수심을 고려하기 위해 Fig. 3의 부산 신항 LNG 터미널↔부산항 정박지 운항 구간을 검토하여 천수효과를 가장 크게 받을 수 있는 최저수심 30m를 운동계산에 적용하였다.

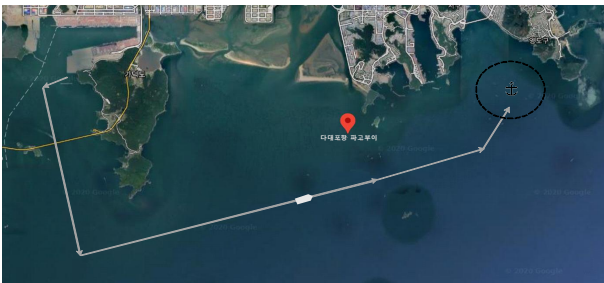


Fig. 3. LNG bunkering ship's route and Position of wave measurement buoy.

파랑 스펙트럼은 부산 연안의 파고와 파주기를 분석하여 적합한 스펙트럼을 통계적으로 분석한 Suh et al.(2008)을 참고하여 Bouws et al.(1985)에 의해 고안된 TMA 스펙트럼을 채택하였다. TMA 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼에 Kitaigorodskii et al.(1975)가 개발한 형상함수를 곱한 형태로 유한수심의 영향을 반영한 스펙트럼이다. JONSWAP 스펙트럼은 Goda(2000)가 제안한 형태를 사용하였으며, Kitaigorodskii의 형상함수는 Thompson and Vincent(1983)이 제안한 근사식을 이용하여 TMA 스펙트럼을 식(1)에서 식(7)과 같이 적용하였다.

$$S_{TMA}(\omega) = S_J(\omega) \times \Phi(\omega_h, h) \tag{1}$$

$$S_J(\omega) = \frac{\beta H_s^2 T_p^4}{\omega^5} \exp[-1.25(\frac{T_p}{\omega})^4] \gamma^{\exp[-\frac{(\omega - T_p)^2}{2\sigma^2 T_p^2}]} \tag{2}$$

$$\beta = \frac{0.0624(1.094 - 0.01915 \ln \gamma)}{[0.23 + 0.0336\gamma - \frac{0.185}{1.9 + \gamma}]} \tag{3}$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 (\omega \leq \omega_p) \\ \sigma_b = 0.09 (\omega > \omega_p) \end{cases} \tag{4}$$

$$\Phi(\omega_h, h) = \begin{cases} 0.5\omega_h^2 & (\omega_h \leq 1) \\ 1 - 0.5(2 - \omega_h)^2 & (1 < \omega_h \leq 2) \\ 1 & (\omega_h > 2) \end{cases} \tag{5}$$

$$\omega_h = \omega \sqrt{\frac{h}{g}} \tag{6}$$

$$T_p = \frac{T_z}{\sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}}} \tag{7}$$

여기서, H_s (Significant wave height)는 유의파고, T_z (Mean zero-crossing wave period)는 평균 영점 통과 파주기, T_p (Peak wave period)는 첨두 파주기, γ 는 첨두 증대계수, h 는 수심, g 는 중력가속도를 나타낸다. 첨두 증대계수 γ 값은 일반적으로 적용하는 3.3을 사용하였으며, Fig. 4는 $H_s = 3$ m, $T_z = 6.5$ sec 그리고 $h = 30$ m에서의 TMA 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼의 차이를 보여주고 있다.

TMA 스펙트럼에 필요한 유의파고와 첨두 파주기에 대한 데이터는 Fig. 3과 같이 운항 경로에 인접한 다대포항 파고 부이(위도 35.02°, 경도 128.95°)에서 관측된 기상청자료를 활용하였다. 기상청에서 제공한 파주기는 평균 영점 통과 파주기이기 때문에(Korea Meteorological Administration, 2018), 식(7)을 사용하여 첨두 파주기로 변환하여 식(1)의 TMA 스펙트럼에 적용하였다.

Table 5. Table of Wave occurrence at the Dadaepo wave measurement buoy

H_s (m)	T_z (sec)																				
	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	13.5
0	18	120	509	894	814	543	394	263	191	139	95	86	52	32	17	10	2	2	0	0	0
0.5	70	691	2236	4400	5594	5659	4603	3349	2168	1344	678	445	210	131	68	22	13	6	3	1	1
1	0	0	38	222	376	605	861	1062	896	615	384	193	100	74	54	34	14	6	3	0	0
1.5	0	0	0	0	10	56	111	164	201	226	148	103	55	19	18	6	8	3	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	13	30	55	45	58	29	33	16	11	7	1	1	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0	0	2	16	20	22	26	19	10	4	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	8	8	8	9	0	0	1	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	4	7	2	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	8	2	1	0	1	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

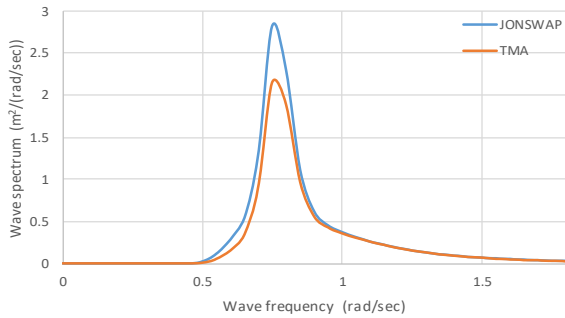


Fig. 4. JONSWAP & TMA Wave spectrum.
($H_s = 3$ m, $T_z = 6.5$ sec, $h = 30$ m)

다대포항 파고부이에서 취득한 자료기간은 2015년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 5년간 1시간 간격으로 취득하였으며, 그 중 708개가 유실되어 총 43,095개의 유의파고와 평균 영점 통과 파주기에 대한 자료를 확보하였다. 수집한 자료에서 해사안전법 제38조에 따른 선박의 출항통제 조건인 유의파고 5 m 이상의 풍랑/폭풍해일 경보가 발령날 경우와 해당 해역이 과거 태풍의 영향권이었던 경우를 포함한 총 53개를 제외하여 43,042개의 유효값을 선박의 내항성능 평가에 사용하였다(Ministry of Oceans and Fisheries of Republic of Korea, 2020). 유효값을 각각 0.5 m 간격의 유의파고와 0.5초 간격의 평균 영점 통과 파주기로 분류하여 Table 5와 같이 파랑 발생 빈도 테이블을 정리하였다.

Table 5에서 유의파고 0 m는 0.25 m 이하의 유의파고이며, 4.8 m는 유의파고 5 m 미만 중 4.5 m 구간(4.25~4.75 m)에 속하지 않는 최대 파고이다. 가장 발생빈도가 높은 유의파고는 0.5 m 구간으로 파랑 출현율은 전체의 약 73 %이다.

3. 해석 기법

3.1 선체 운동 주파수 응답 해석

연안선박용 LNG 병커링 전용 선박에 대한 운동해석을 위해 적재조건은 Table 2의 만재 조건과 평형수 적재 조건을 사용하였으며, 주파수 영역에서 선박 운동을 수행하여 응답 진폭함수(Response Amplitude Operator, RAO)를 구하였다. 내항성능 평가에 필요한 선체운동 응답 스펙트럼 $S_\alpha(\omega)$ 은 선박 운동 응답진폭함수(RAO)와 Table 4로 명시된 5년간 해상 상태의 파랑 스펙트럼 $S_\zeta(\omega)$ 을 식(8)과 같이 주파수 영역상에서 합성곱정리를 적용해 구하였다.

$$S_\alpha(\omega) = S_\zeta(\omega) \times |RAO(\omega)|^2 \quad (8)$$

여기서, $S_\alpha(\omega)$ 는 응답 스펙트럼, $S_\zeta(\omega)$ 는 파랑 스펙트럼, ω 는 파랑 주파수를 의미한다. Fig. 5와 같이 유한수심에서 전진 속도가 있는 선박이 만나는 조우 주파수(Encounter frequency, ω_e)는 선속(V_s)과 식(9)로 정의된 파랑 주파수로 부터 식(10)과 같이 계산되며, 이러한 내항성능 평가에 사용되는 선박이 경험하는 응답 스펙트럼 n차 모멘트는 식(11)로 정의된다.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (9)$$

$$\omega_e = \omega [1 - V_s k \cos(\beta)] \quad (10)$$

$$m_n = \int_0^\infty \omega_e^n S_\alpha(\omega) \delta\omega \quad (11)$$

여기서, k 는 파수(Wave Number), g 는 중력가속도, h 는 수심, β 는 파의 조우각(Heading Angle)이다.

$$\zeta_{\frac{1}{3}} = 2\sqrt{m_0} \quad (12)$$

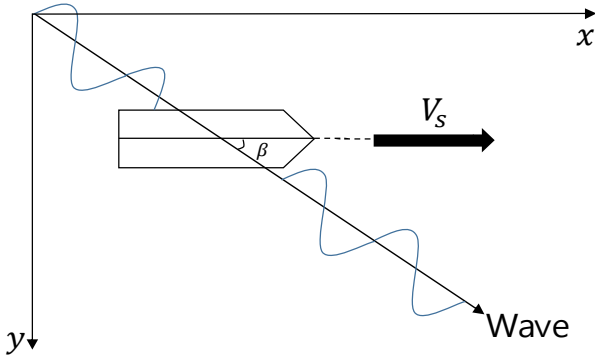


Fig. 5. Definition of encounter wave angle.

3.2 내항성능 평가 방법

연안선박용 LNG 병커링 전용 선박에 대한 내항성능 평가는 Table 6과 같이 NORDFORSK(1987) 및 NATO(2000)에서 제안한 내항성능 평가 기준을 적용하였으며, 내항성능을 정량적으로 평가하기 위해서 총 6가지 선박 응답 항목에 대하여 Operation과 Survival 기준을 사용하였다. Operation 기준은 운항자가 운항중 업무를 정상적으로 수행할 수 있는지 여부를 나타내며 Survival 기준은 선박의 안정성이 문제가 되는 여부를 구분하고 있다.

Table 6의 횡동요, 종동요, 수직 가속도 그리고 수평 가속도는 유의단일진폭(Single Significant Amplitude, SSA)으로 구하며, 이는 식(12)와 같이 식(11)로 구한 선박 응답 스펙트럼의 0차 모멘트 m_0 값으로 정의 된다.

Table 6. Seakeeping performance criteria for naval ship

Motion Response	Reference location	Units	Criterion	
			operation	Survival
Roll	Center of gravity	SSA(deg)	8.0	30
Pitch	Center of gravity	SSA(deg)	4.8	8.0
Vertical acceleration	Center of bridge	SSA(g)	0.4	0.8
Parallel Acceleration	Center of bridge	SSA(g)	0.2	0.4
Deck wetness	F.P	No./hour	30	50
Slamming	0.15LBP abaft F.P	No./hour	20	50

Fig 6은 각 내항성능 평가 위치를 보여주고 있으며, Table 6에서 횡동요와 종동요의 평가는 Table 2의 무게중심 위치를 적용하였고, 수직 가속도, 수평 가속도, 갑판침수(Deck wetness) 및 슬래밍(Slamming)의 평가는 Table 7의 위치를 적용하여 수행하였다.

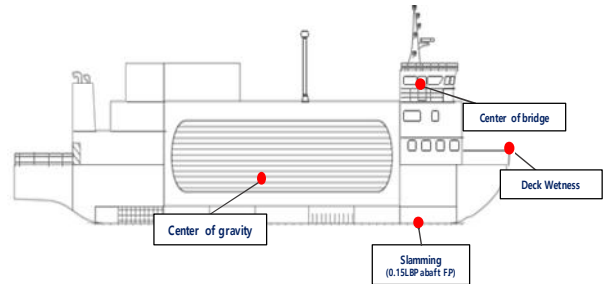


Fig. 6. Positions for assessment of sea-keeping performance.

Table 7. Position specifics for the assessments

Reference location	Longitudinal distance from aft perpendicular	Vertical distance from keel
Center of bridge	39.75 m	10.70 m
Deck wetness	46.45 m	5.55 m
Slamming	38.80 m	0 m

내항성능 평가에 적용되는 해상상태는 Table 5 내에 발생빈도가 있는 유의파고와 평균 영점 통과 파주기를 적용하여 해당 파랑 스펙트럼을 구하고, 식(8)과 식(11)로 해당 응답의 0차 스펙트럼 모멘트를 구하여 식(12)에 적용하였다.

갑판침수(Deck wetness)는 Table 6에 주어진 것과 같이 발생 확률로부터 얻어지는 시간당 발생 횟수로 평가를 수행하였다. 갑판침수의 발생 확률은 Ochi and Motter(1974)에 의하여 파도의 높이가 선수 불위크(Bulwark) 상부의 수직 변위를 초과할 확률 P_{DW} 로 식(13)과 같고, 시간당 갑판침수 발생 횟수는 P_{DW} 값에 평균 영점 통과 파주기 T_z 로 나눈 식(14)와 같이 제안하였다.

$$P_{DW} = e^{-\left(\frac{f_{DW}^2}{2m_{0s}}\right)} \quad (13)$$

$$N_w = \frac{P_{DW}}{T_z} \times 3600 = \frac{3600}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2s}}{m_{0s}}} e^{-\left(\frac{f_{DW}^2}{2m_{0s}}\right)} \quad (14)$$

여기서, f_{DW} 는 Fig. 6의 갑판침수 평가 위치와 해당 위치에서 흘수의 수직 변위, m_{0s} 와 m_{2s} 는 갑판침수 평가 위치에서 파와의 수직 변위에 대한 응답 스펙트럼 모멘트로 식(11)로 구할 수 있다.

슬래밍(Slamming)의 내항성능 평가는 Ochi(1964)에 의하여 선박의 선저가 수면과 맞닿았을 때 파에 대한 선저의 상대속도가 한계속도를 초과할 확률로 식(15)와 같이 구하였으며, 이때 시간당 슬래밍의 발생횟수는 P_{SLAM} 값에 평균 영점 통과 파주기 T_z 으로 나눈 식(16)으로 구하였다.

$$P_{SLAM} = e^{-\left(\frac{f_{slam}^2}{2m_{0s}} + \frac{v_0^2}{2m_{0v}}\right)} \quad (15)$$

$$N_s = \frac{P_{SLAM}}{T_z} \times 3600 \quad (16)$$

$$= \frac{3600}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2s}}{m_{0s}}} \times e^{-\left(\frac{f_{slam}^2}{2m_{0s}} + \frac{v_0^2}{2m_{0v}}\right)}$$

$$v_0 = 0.093 \sqrt{gL} \quad (17)$$

여기서, f_{SLAM} 은 슬래밍 평가 위치와 그 위치에서 흘수와 수직 변위, m_{0v} 는 슬래밍 평가 위치에서 파와의 상대속도에 대한 0차 응답 스펙트럼 모멘트이다. 식(17)의 v_0 는 파에 대한 선저의 수직 상대 속도 한계치이며, g 는 중력가속도와 L 은 수선간장 길이이다.

4. 내항성능 결과 및 해석

4.1 선체운동 RAO

선체운동 RAO는 단위 진폭에 대한 선박의 응답으로 선박의 고유한 운동특성을 나타낸다. Table 6을 기준으로 한 내항성능을 평가하기 위해 총 7가지 선박운동 RAO인 횡동요, 종동요, 수직 가속도, 수평 가속도 RAO 그리고 갑판침수를 구하기 위한 갑판침수 평가 위치에서 파와의 상대 수직변위 RAO 및 슬래밍을 구하기 위한 슬래밍 평가 위치에서 파 수직 변위 RAO와 상대 속도 RAO를 계산하였다.

Table 6의 선박 내항성능 평가에서 횡동요와 수평 가속도에 큰 영향을 주는 선박의 6자유도 성분중 하나는 횡동요이다. Fig. 7과 Fig. 8은 선속 8노트의 평형수 적재 조건에서 서로 다른 횡동요 감쇠 계수 5%와 10%를 적용한 횡동요 RAO를 파의 조우각에 따라 나타낸 것이며 조우각 90도와 파랑 주파수 0.95 rad/sec에서 감쇠 계수 5%일 때 34.5 deg/m와 감쇠 계수 10%일 때는 16.2 deg/m의 최대값을 갖는 것을 알 수

있다. 횡동요 RAO는 침두 값 주변에서 횡동요 응답값이 집중되어있는 것이 특징이며, 이 주파수대역에 에너지가 집중된 Fig. 4와 같은 파랑 스펙트럼과 합성되면 큰 횡동요 응답이 발생하게 된다.

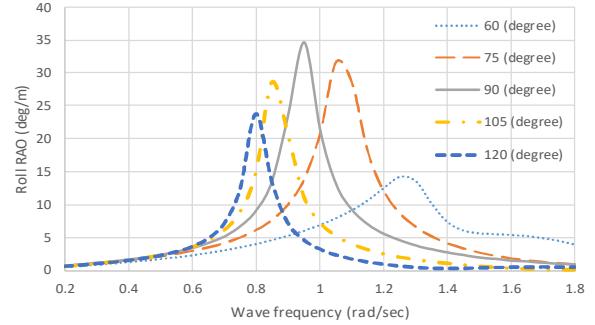


Fig. 7. Roll RAO in Ballast condition. (Roll damping coefficient 5%)

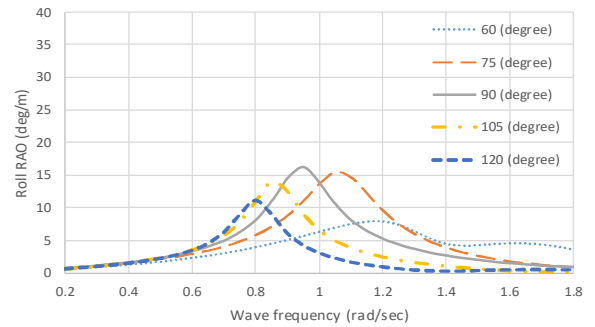


Fig. 8. Roll RAO in Ballast condition. (Roll damping coefficient 10%)

Fig 9과 Fig. 10은 조우각 180도일 때 두 적재조건에서 각 선속의 종동요 RAO를 나타내며, 종동요 RAO는 횡동요 감쇠 계수에 영향이 거의 없으므로 감쇠 계수 5%의 경우만 나타내었다. 이러한 종동요 RAO는 선속이 빠를수록 최대 응답값이 발생하는 것을 알 수 있고, 최대 응답 값은 파 조우각 180도와 선속 8노트에서 만재시 0.95 rad/sec, 평형수 적재시 1 rad/sec에서 침두값 각각 4.66 deg/m와 4.90 deg/m가 나타났다.

좌우동요 운동 RAO는 횡동요 다음으로 수평가속도에 영향을 주며, 운항해역의 수심에 영향을 받는 성분이다. Fig. 11과 Fig. 12은 유한수심 30m와 무한수심에 대한 각 적재조건에서의 좌우동요 RAO를 나타낸 것으로 파랑색 선은 유한수심에서의 좌우동요 RAO이며 주황색 선은 무한수심에서 계산한 좌우동요 RAO를 나타내고 있다. 유한수심의 RAO는 천수효과로 0.75 rad/sec 이하의 저주파수 대역에서 무한수심의 RAO보다 좌우동요 운동 응답 값이 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 내항성능 평가에 대한 연구

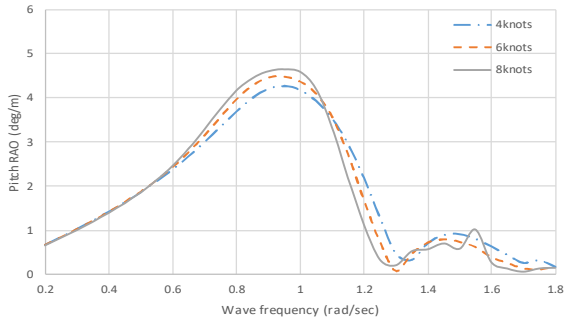


Fig. 9. Pitch RAO in Full load condition

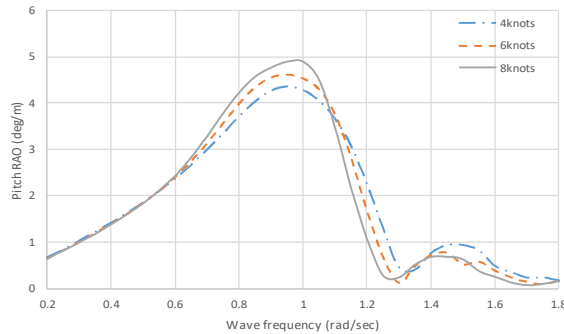


Fig. 10. Pitch RAO in Ballast condition

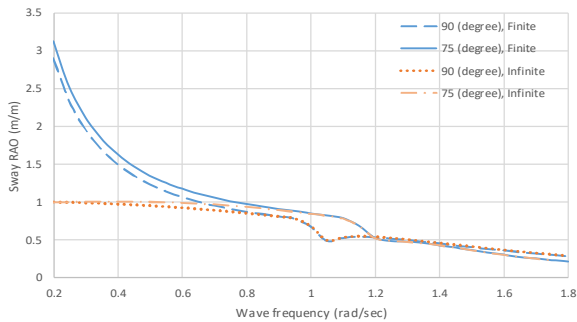


Fig. 11. Sway RAO in Full load condition

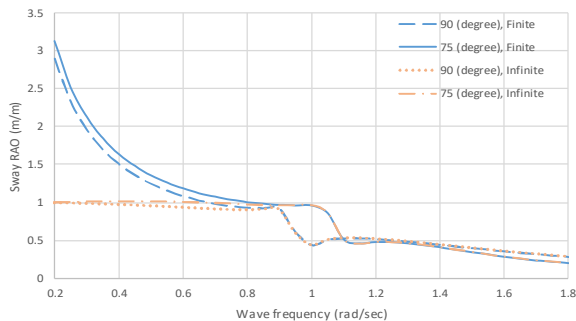


Fig. 12. Sway RAO in Ballast condition

본 연구에서 적용한 횡동요 감쇠 계수는 모든 조건에서 통상적인 값 5%와 10%를 적용하여 계산 하였으나, 추후에

시운전 또는 모형시험이 수행되어 정확한 횡동요 감쇠 계수가 적용될 필요가 있다.

4.2 내항성능 평가 결과

Table 8과 Table 9는 각 유의파고 구간에서 다양한 응답 평가 항목의 최대값을 도출하여 얻은 두 적재조건에 대한 내항성능 평가 결과표이다. 각 적재조건에 따른 결과 값을 비교하면 평형수 적재조건에서보다 만재 조건에서 대체로 작은 값을 나타내었다.

내항성능 평가는 Survival기준과 Operation기준을 초과하는 결과 값이 어떤 유의파고에서 발생하는지 확인하여 유의파고 구간에 따른 평가를 수행하였다. Survival기준은 두 적재조건 모두 횡동요 감쇠 계수 5%의 수평 가속도 항목을 제외한 모든 항목의 유의파고 구간에서 만족하였으며, 수평 가속도는 횡동요 감쇠 계수 5%일 때 만재 조건에서 유의파고 2 m 이하, 평형수 적재조건에서 유의파고 1.5 m 이하일 때 Survival기준을 만족 하였다. 각 평가항목에서 유의파고 4.8 m에서 결과 값이 유의파고 4.5 m에서의 결과 값보다 작은 것이 확인되는데 이는 합성한 파랑 스펙트럼의 유의파고 크기보다 첨두 값을 갖는 주파수대가 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다.

Operation기준도 마찬가지로 두 적재조건 모두 수직 가속도와 슬래밍 항목은 모든 유의파고 구간에서, 종동요는 유의파고 2.5 m 이하, 갑판침수는 유의파고 3.5 m 이하에서 Operation기준을 만족하였다. 수평가속도와 횡동요는 적용된 감쇠 계수에 따라 만족하는 유의파고 한계치가 달라졌으며, 특히 횡동요 감쇠 계수를 5% 적용시 유의파고 0.5 m 이하에서, 10% 적용시 1.0 m 이하에서 Operation기준을 만족하였다. 내항성능 평가항목의 결과와 파 조우각의 관계를 살펴보면 횡동요와 수평가속도의 최대값은 파 조우각 90도 및 105도에서 각각 발생하였고, 종동요, 수직가속도, 갑판침수 그리고 슬래밍은 파 조우각 180도에서 최대값이 발생하였다.

4.3 내항성능 평가 결과를 고려한 운항가능 기간

Operation기준은 유의파고 0.5 m 이하에서 모든 내항성능 평가를 만족하지만, Survival기준만을 만족하는 경우도 LNG 병커링 전용선박의 운항가능 기간을 산출한다면 배제할 수 없다. 파랑 발생빈도를 기준으로 연안선박용LNG 병커링 전용선박의 운항가능 기간을 산출한다면 Table 10과 같다. 즉, 횡동요 감쇠 계수 5%일 때 Operation 기준 한계 값인 유의파고 1 m 미만이 발생하는 확률은 83.3%이고, 횡동요 감쇠 계수 10%일 때의 Operation 기준 한계 값인 유의파고 1.5 m 미만이 발생하는 확률은 96.2%이다. 횡동요 감쇠 계수 5%일 때 Survival 기준 한계 값인 유의파고 2 m 미만이 발생하는

Table 8. Seakeeping performance assessment at an interval of Significant wave heights in full load condition

Response		H_s (m)										Oper.	Suv.
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	4.8		
Pitch (deg)		0.9	1.9	2.8	3.7	4.5	5.0	5.4	6.1	6.3	6.2	4.8	8.0
Roll (deg)	5%	4.3	8.6	12.9	14.0	14.2	15.1	15.8	18.1	18.4	17.7	8.0	30.0
	10%	2.7	5.3	8.0	9.2	9.8	10.5	11.0	12.5	12.8	12.4		
Vertical Acceleration (g)		0.1	0.12	0.19	0.23	0.26	0.27	0.28	0.32	0.33	0.31	0.4	0.8
Parallel Acceleration (g)	5%	0.12	0.24	0.36	0.40	0.39	0.39	0.41	0.47	0.47	0.45	0.2	0.4
	10%	0.08	0.16	0.24	0.27	0.28	0.28	0.29	0.33	0.34	0.32		
Deck wetness (No./hr)		0.0	0.0	0.2	3.7	9.5	14.3	18.3	44.0	45.9	36.7	30.0	50.0
Slamming (No./hr)		0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	1.1	1.6	7.0	7.3	4.9	20.0	50.0

Table 9. Seakeeping performance assessment at an interval of Significant wave heights in ballast condition

Response		H_s (m)										Oper.	Suv.
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	4.8		
Pitch (deg)		1.0	1.9	2.9	3.9	4.6	5.1	5.5	6.3	6.5	6.3	4.8	8.0
Roll (deg)	5%	4.8	9.6	14.4	17.4	17.9	17.5	18.2	20.9	21.2	20.6	8.0	30.0
	10%	2.8	5.5	8.3	10.6	11.3	11.7	12.2	14.0	14.2	13.8		
Vertical Acceleration (g)		0.06	0.13	0.19	0.24	0.26	0.28	0.29	0.33	0.33	0.32	0.4	0.8
Parallel Acceleration (g)	5%	0.13	0.25	0.38	0.45	0.48	0.46	0.47	0.53	0.54	0.52	0.2	0.4
	10%	0.08	0.16	0.25	0.29	0.32	0.32	0.33	0.37	0.37	0.36		
Deck wetness (No./hr)		0.0	0.0	0.2	3.7	9.5	14.3	18.3	44.0	45.9	36.7	30.0	50.0
Slamming (No./hr)		0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	1.1	1.6	7.0	7.3	4.9	20.0	50.0

확률은 98.8%이고, 횡동요 감쇠 계수 10%일 때의 Survival기준은 모든 유의과고에 대하여 만족한다.

여객선을 제외한 대상 선박 규모에 따른 선박에 대한 출항 금지 국내 규정은 유의과고 5 m 이하이고, Sung and Ock(2019)의 논문을 참고 하였을 때 해당 선박 규모에 대한 황천항해의 기준이 보퍼트 풍력계급 7~8임을 알 수 있으며, 통상적인 선박운항관리절차서상에 명시된 보퍼트 풍력계급 7~8인 황천항해시(과고 약 4 m 이상) 선박 운항 위험에 대비하여 황천항해 운항 점검표(Check list for heavy weather)작성을 권고하고 있다. 따라서 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 LNG 터미널↔부산항 정박지 운항시 출항 전 확인할 수 있는 유의과고를 점검하고 Survival기준을 만족 또는 Operation 기준을 만족여부에 대한 연안선박용 LNG 병커링 전용 선박 운용 관리 매뉴얼을 마련할 필요가 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 포텐셜 유동 운동해석과 실제 운항 구간의 해상상태를 취득하여 유의과고별 연안선박용 LNG 병커링 전용 선박의 내항성능을 평가하였다. 내항성능 평가시 파주파수, 파 조우각, 선속, 횡동요 감쇠계수 그리고 적재조건에 맞춘 횡동요 회전반경을 다양하게 고려하여 선박 운동계산을 수행하였고 실측 해양파 데이터를 적용하여 내항성능 평가를 수행하였다. 유의과고 구간별로 선박의 내항성능 평가항목이 최대가 되는 값을 기준으로 분석하였으며 내항성능 평가 기준인 Survival기준과 Operation기준을 고려하여 부산 신항 LNG 터미널↔부산항 정박지를 운항하는 연안선박용 LNG 병커링 전용 선박의 유의과고 구간에 따른 선박의 안정성과 운영 적합성을 제시하였다.

결과적으로 현재 건조되고 있는 연안선박용 LNG 병커링 전용선박은 유의과고 0.5 m 이하에서 모든 내항성능 평가 기준을 만족하였다. 그리고 연안선박용 LNG 병커링 전용 선박의 안전운항과 관련하여 전체 해상에 대하여 유의과고 0.5 m 이하의 발생률은 83.3%로 1년 365일로 환산한다면 약 304일 정도임에 따라 해당 기간 동안 안전한 연료유 공급이 가능하다. 또한, 연안선박용 LNG 병커링 전용선박 자체의 안정

Table 10. Ratio of days available of LNG bunkering ship

Roll damping coefficient (%)	H_s	
	Operational	Survival
5.0	83.3 %	98.8 %
10.0	96.2 %	100 %

성의 기준이 되는 Survival기준은 유의파고 1.5 m에서 모든 내항성능 평가 기준을 만족하였으며, 이에 따른 운항가능 기간은 98.8%로 1년 중 약 360일 정도가 됨을 확인 할 수 있다.

이 연구를 바탕으로 연안선박용 LNG 병커링 전용선박이 일반 상선의 황천 항해와 마찬가지로 안전 유의파고를 초과하는 해상에서 운항할 경우를 대비한 운항 점검표의 개발 뿐만 아니라 향후 확대될 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 운항빈도를 고려하여 출항 전 인근 해역의 유의파고를 실시간으로 확인하고 Survival기준의 만족 또는 Operation기준의 만족여부를 판단하여 최종적으로 출항통제 및 관리가 효과적으로 적용될 수 있도록 관련 연구를 추진할 필요가 있다. 마지막으로, 추후에 연구에서는 본 연구에서 수행한 운동성능의 검증에 위하여 시운전 또는 연안선박용 LNG 병커링 전용선박의 선형으로 모형시험을 수행하여 결과를 비교할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 “LNG 병커링 운영체제 및 위험도 평가기반 운영기술개발” (PMS4310)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

This work was supported by a grant from the National R&D Project of “Development of LNG Bunkering Operation Technologies based on Operation System and Risk Assessment” funded by Ministry of Oceans and Fisheries, South Korea (PMS4310).

이 논문은 2020년도 BB21+사업에 의하여 지원되었음.

This work was supported by the BB21+ Project in 2020.

References

- [1] American Bureau of Shipping(ABS)(2005), Guidance notes on “Safehull-dynamic loading approach” for container carriers, pp. 1-12, pp. 13-14.
- [2] Balcombe, P., J. Brierley, C. Lewis, L. Skatvedt, J. Speirs, A. Hawkes, and I. Staffell(2019), How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies, Energy Convers Manag, 182, pp. 72-88, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>.
- [3] Bouws, E., H. Günther, W. Rosenthal, and C. L. Vincent (1985), Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 90(C1), pp. 975-986.
- [4] Ghaemi, M. H. and H. Olszewski(2017), Total ship operability - review, concept and criteria. Polish maritime research, Vol. 24, s1(93), pp. 74-81.
- [5] Goda, Y.(2000), Random seas and design of maritime structures, Advanced Series on ocean engineering, Vol. 15, pp. 25-30.
- [6] IMO(2018), Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships: Resolution Mepc.304(72), London: IMO.
- [7] 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 & Safety, Vol. 9, No. 1, pp. 41-50.
- [8] Kim, S. K. and G. Y. Kong(1997), A Study of the Integrated Seakeeping Performance Index in Seaways, Journal of Navigation and Port Research, 1997, pp. 5-16.
- [9] Kim, Y., J. B. Park, J. C. Park, S. K. Park, and W. M. Lee (2019), Development of an Evaluation Procedure for Seakeeping Performance of High-speed Planing Hull using Hybrid Method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 3, pp. 200-210.
- [10] Kitaigordskii, S. A., V. P. Krasitskii, and M. M. Zaslavskii (1975), On Phillips’ theory of equilibrium range in the spectra of wind-generated gravity waves, Journal of Physical Oceanography, Vol. 5, No. 3, pp. 410-420.
- [11] Korea Meteorological Administration(2018), Ocean Weather Observation Guidelines, pp. 2-5.
- [12] Korean register of shipping(KR)(2017), Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, KR-Rules, Vol. 13, pp. 165-166.
- [13] Lee, S. Y., C. Jo, B. Pettersen, H. Chung, S. Kim, and D. Chang(2018), Concept design and cost-benefit analysis of pile-guide mooring system for an offshore LNG bunkering terminal, Ocean Engineering, Vol. 154, pp. 59-69.
- [14] Ministry of Oceans and Fisheries of Republic of Korea(MOF) (2020), Ministry of Oceans and Fisheries Decree No. 420, Article 31 of the Enforcement Rule of the Maritime Traffic Safety Act, 2020.08.28.
- [15] NORDFORSK(1987), Assessment of ship performance in a seaway, Nordic cooperative Project: Seakeeping performance of ships, Copenhagen, Denmark.
- [16] North Atlantic Treaty Organization(NATO)(2000), Common procedures for seakeeping in the ship design process, STANAG 4154, 3rd Ed.

- [17] Ochi, M. K.(1964), Prediction of occurrence and severity of ship slamming at sea, Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 545-596.
- [18] Ochi, M. K. and L. E. Motter(1974), Prediction of extreme ship responses in rough seas of the north Atlantic, Proceedings of the International Symposium on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 199-209.
- [19] Oh, S. H., D. H. Jung, J. H. Jung, S. C. Hwang, S. K. Cho, and H. G. Sung(2019), Numerical Study on Towing Stability of LNG Bunkering Barge in Calm Water, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 43, No. 3, pp. 143-152.
- [20] Senjanović, I., J. Parunov, and G. Ciprić(1997), Safety analysis of ship rolling in rough sea, Chaos, Solitons & Fractals, Vol. 8, No. 4, pp. 659-680.
- [21] Suh, K. D., H. D. Kwon, and D. Y. Lee(2008), Statistical characteristics of deepwater waves along the Korean Coast, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 4, pp. 342-354.
- [22] Sung, Y. J. and Y. B. Ock(2019), Progress of the 2013 Interim Guidelines for Determining Minimum Propulsion Power to Maintain the Manoeuvrability of Ships in Adverse Conditions, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 6, pp. 497-506.
- [23] Tello, M., S. R. e Silva and C. G. Soares(2011), Seakeeping performance of fishing vessels in irregular waves, Ocean Engineering, Vol. 38, pp. 763-773.
- [24] Thompson, E. F. and C. L. Vincent(1983), Prediction of Wave Height in Shallow Water, Proceedings of Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, pp. 1000-1008.

Received : 2020. 10. 06.

Revised : 2020. 11. 10.

Accepted : 2020. 12. 28.