

LNG 벙커링 바지의 예인력 산정에 관한 연구

† 오승훈 · 정동호* · 정재환** · 황성철*** · 조석규**** · 성흥근*****

,*,*****,† 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Study on the Estimation of Towing Force for LNG Bunkering Barge

† Seung-Hoon Oh · Dong-Ho Jung* · Jae-Hwan Jung** · Sung-Chul Hwang*** · Seok-Kyu Cho**** · Hong-Gun Sung*****

,*,*****,† Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

요 약 : 본 논문에서는 LNG 벙커링 바지에 대한 예인력을 계산하였다. 친환경 에너지원인 LNG(액화천연가스)의 전환을 위한 인프라로 LNG 벙커링 바지가 개발되고 있다. LNG 벙커링 바지의 경우, 부선의 형태로 개발되고 있으나 향후 운용관점에서 추진기 탑재 개조(Retrofit)를 통한 자항추진을 고려하고 있다. 따라서 LNG 벙커링 바지는 일반적인 예인바지와 비교하여 선박의 선형과 유사하기 때문에 선급의 부선 규칙을 통한 예인력은 과대 추정된다. 이를 극복하기 위해, 정수 중 저항은 Rankine source method를 이용한 조파저항을 고려하여 ITTC 1978 방법에 따라 계산하였고 파랑 중 부가저항은 NMRI의 단파장 보정이 고려된 수정된 방사에너지법을 이용하여 계산하였다. 계산된 정수 중 저항과 부가저항을 통해 예인저항 성능을 KR 선급의 부선 규칙과 비교 검토하였다.

핵심용어 : 액화천연가스, 벙커링 바지, 예인력, 정수 중 저항, 파랑 중 부가저항

Abstract : In this paper, the towing force for the LNG bunkering barge was investigated. Currently, LNG bunkering barge is being developed as an infrastructure for the bunkering of LNG (Liquefied Natural Gas), an eco-friendly energy source. In the case of the LNG bunkering barge, self-propulsion is considered through retrofit from an operating point. Therefore, the LNG bunkering barge's shape is similar to that of the ship as compared to a towed barge, so a rule of the towed barge overestimates the towing force. In order to improve accuracy, the calm water resistance was calculated using ITTC 1978 method which considers wave resistance by the Rankine source method. The added resistance in waves was calculated using the modified radiated energy method which considers the shortwave correction method of NMRI. The performance of the towing resistances through the calm water resistance and the added resistance in waves was compared to rules associated with towed barges.

Key words : Liquefied Natural Gas, Bunkering Barge, Towing Force, Calm Water Resistance, Added Resistance in Waves

1. 서 론

국제해사기구에서 선박의 배출가스 규제 강화로 선박연료로써 친환경 에너지원인 LNG(Liquefied natural gas)의 관심이 높아지고 있다. 하지만 국내에는 LNG 추진선박에 LNG를 공급할 수 있는 LNG 터미널 또는 LNG 벙커링 서틀과 같은 인프라의 부재로 truck to ship을 통한 벙커링이 특정 항구에서 제한적으로 수행되고 있다. 이와 같은 인프라의 부재는 선박연료로써 LNG 전환에 걸림돌이 되고 있다. 선박해양플랜트연구소에서는 이를 해결하기 위해 연안선박 맞춤형 LNG 벙커링 시스템 개발 과제를 통해 실제 LNG 벙커링 바지를 건조하여 Fig. 1과 같이 ship to ship 벙커링 실증을 목

표로하고 있다. 현재 LNG 벙커링 바지는 예선에 예인되는 부선의 형태로 개발되고 있지만 추후 추진기 탑재 및 개조(Retrofit)를 고려하기 위해 Propulsion ready로 설계가 진행되고 있다. 따라서 LNG 벙커링 바지는 부선과 비교하여 선박에 가까운 선형을 가지기 때문에 부선으로써 예인선의 용량 산정과 예인선의 장력 추정은 물론 추진기 탑재 및 개조 이후, 저항성능을 정확히 추정하는 것 또한 LNG 벙커링 바지의 운용관점에서 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 이러한 배경에서 LNG 벙커링 바지의 예인력 계산을 수행하고자 한다.

부선의 예인력은 KR 선급규칙(KR, 2014)에서 부선의 마찰저항, 조파저항, 공기저항 및 기타 부가저항으로 분류된 간단한 수계산식으로 계산할 수 있다. 하지만 수식이 간결한 선급

† Corresponding author : 정희원, carot541@kriso.re.kr 042)866-3921

* 정희원, dhjung@kriso.re.kr 042)866-3962

** 정희원, jaehwan@kriso.re.kr 042)866-3968

*** 정희원, schwang@kriso.re.kr 042)866-3970

**** 정희원, skcho33@kriso.re.kr 042)866-3933

***** 정희원, hgsung@kriso.re.kr 042)866-3931

(주) 이 논문은 “LNG 벙커링 바지의 예인력 계산에 관한 연구”란 제목으로 “2018 한국항해항만학회 추계학술대회논문집(경주 더케이호텔, 2018.11.08-09, pp.158-161)”에 발표되었음.

규칙을 이용할 경우, 선형정보가 정확히 반영되지 않아 선박의 형태를 가지는 LNG bunker링 바지의 예인력이 과대추정될 수 있다. Kim et al.(2013)의 경우, 기존 부선의 예인력을 계산하는 선급 규칙과 미해군 추정식을 비교 검토하였으며 검토된 간이식들이 실제보다 과도한 예인력을 제공하는 것을 확인하였다. 이에 대하여 안전을 관점에서 검토된 규칙과 추정식을 사용하고 있지만 좀더 정확한 값을 제공하는 방법을 사용하는 것이 바람직하다고 평가하였다. 파랑 중 부가저항의 경우, 선급 규칙 상 유의과고에 따라 일괄적으로 적용되기 때문에 Ahn and Lee(2010)는 예부선의 속력, 선수형상 및 파도의 만남각을 고려한 산정식이 필요하다고 언급하였다. 이외에도 Nam et al.(2012)과 Nam et al.(2014)은 선박의 예인력 및 예인력의 장력 계산을 위한 수식을 검토하였으며 실선 계측을 통해 비교 검증하였다.



Fig. 1 Ship to ship bunkering using LNG bunkering barge

본 연구에서는 ship to ship LNG bunker링에 활용될 LNG bunker링 바지의 예인력을 추정하였다. LNG bunker링 바지의 예인력은 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항의 합으로 정의하였다. 정수 중 저항 계산은 ITTC 1978 방법을 통해 수행되었다. Rankine source method를 이용하여 정수 중 조파저항 성분을 계산하였고 ITTC 1957 모형선-실선 상관공식과 작은 어선이나 예선들의 자료를 통해 도출된 Van Oortmerseen (1971)의 형상계수를 적용하여 점성저항 성분을 계산하였다. 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항 추정을 위해 NMRI(National Maritime Research Institute) 단파장 보정이 고려된 수정된 방사에너지법(Oh and Yang, 2015)를 이용하여 규칙파의 파랑 중 부가저항 R.A.O를 계산 적용하였다. 계산된 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항을 통해 LNG bunker링 바지의 예인력을 추정하고 그 결과를 선급규칙(KR, 2014)과 비교 검토하였다. 추가로 LNG bunker링 바지의 제정회원 변화에 따른 파랑 중 부가저항 민감도 테스트를 수행하였다.

2. 예인력 계산법

2.1 정수 중 저항 계산법

실선의 정수 중 저항 R_{TS} 은 식(1)과 같이 정의된다.

$$R_{TS} = C_{TS} \cdot \frac{1}{2} \rho S U^2 \quad (1)$$

여기서 C_{TS} 는 실선의 전저항계수, ρ 는 해수의 밀도, S 는 접수 표면적 그리고 U 는 선속을 의미한다.

전저항 계수 C_{TS} 는 ITTC 1978(ITTC, 2017)에 따르면 식(2)와 같이 정의된다.

$$C_{TS} = C_W + (1 + k_0) C_{FS} \quad (2)$$

여기서 C_W 는 조파저항계수, k_0 는 형상계수(Form factor) 그리고 C_{FS} 는 실선의 마찰저항 계수이다. 형상계수 k_0 는 소형 어선 및 tug 보트들의 저항 결과에서 도출된 Van Oortmerseen(1971)의 방법을 이용하였다. Van Oortmerseen (1971)의 형상계수 k_0 는 식(3)과 같다.

$$k_0 = \frac{139 \cdot C_B^2}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{B}{T}\right)^2 + 1\right]} \quad (3)$$

여기서 C_B 는 방형계수, L 은 선박의 길이, B 는 선폭 그리고 T 는 선박의 흘수이다.

마찰저항계수는 식(4)와 같이 ITTC 1957 모형선-실선 상관공식을 사용하였다.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4)$$

여기서 Rn 은 레이놀드 수를 의미한다.

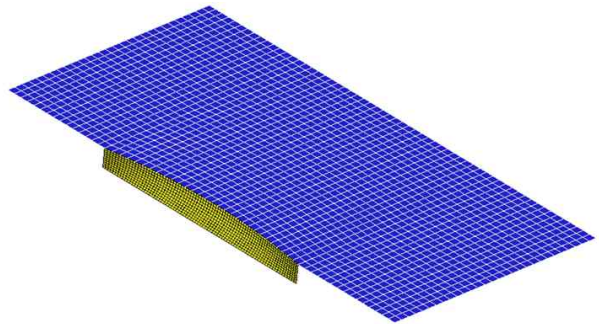


Fig. 2 Panel model for Rankine source method

조파저항계수 C_W 의 계산을 위해 Rankine source method를 이용하였다. 유체의 비점성 및 비압축과 유동의 비회전을 가정하면 속도 포텐셜을 도입할 수 있다. 속도 포텐셜은 유체장과 물체의 경계면에서 라플라스 방정식과 선박의 표면 및 자유수면의 경계조건을 만족해야한다. 주어진 경계치 문제를 풀기위해 선박표면과 자유수면을 Fig. 2와 같이 이산화 한다.

자유수면은 Neumann-kelvin linearization으로 선형화하였

으며 방사조건 만족을 위해 shifting technique(Bertram, 2011)을 이용하였다. 조파저항계수는 식(5)를 통해 계산된다.

$$C_W = \frac{-\iint_{S_b} p \cdot n_x dS}{\frac{1}{2}\rho S U^2} \quad (5)$$

본 방법에 대한 Matlab 언어 기반의 수치코드를 개발하였으며 Wigley에 대한 검증 계산을 수행하였다. 모형시험(Kajitani et al., 1983)과 Fig. 3과 같이 조파저항 계수가 잘 일치함을 알 수 있다.

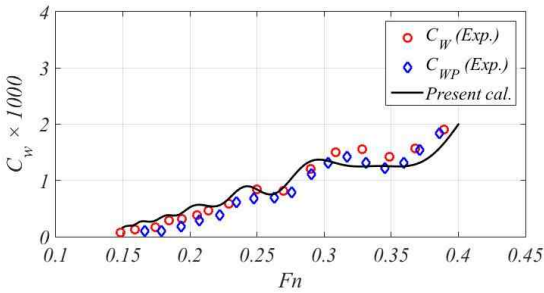


Fig. 3 Wave resistance coefficient for Wigley using Rankine source method

2.2 파랑 중 부가 저항 계산법

선박이 항해 중 파도와 조우할때 입사파에 의한 선박의 상대운동과 반사파의 영향으로 부가저항이 발생하게된다. 일반적으로 파랑 중 부가저항은 점성 저항이 기여하는 부분이 적기때문에 점성효과를 무시한 포텐셜 이론에 기반한 연구가 효율적인 측면에서 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 2차정회원 스트립 방법을 기반한 수정된 방사에너지법과 NMRI 단파장 보정법(Oh and Yang, 2015)을 활용하였다. 파랑 중 부가저항 R_{aw} 은 식 (6)과 같이 정의 된다.

$$R_{aw} = R_{awM} + R_{awR} \quad (6)$$

여기서 R_{awM} 은 선박의 상대운동에 기인한 부가저항을 의미하며 수정된 방사에너지법을 통하여 계산된다. R_{awR} 은 반사파에 기인한 부가저항을 의미하며 NMRI 단파장 보정법을 통해 계산된다. 기존 방사에너지법(Gerritsma and Beukelman, 1972)의 경우, 완전반사가 일어나는 단파장 영역에서 부가저항이 존재하기때문에 NMRI 단파장보정법을 단순히 더하는 것은 물리적으로 모순 된다. 따라서 방사에너지법 계산에 사용되는 상대수직속도를 보정계수를 도입하여 물리적인 모순을 해결하였다. 수정된 방사에너지법은 식(7)과 같이 정의된다.

$$R_{awM} = \frac{k}{2\omega_e} \int_L (b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx}) V_z V_z^* dx \quad (7)$$

여기서 k 는 파수(wave number), ω_e 는 만남 파주파수(encounter wave frequency), b_{33} 는 선박 단면의 2차정회원 파감쇠계수, a_{33} 선박 단면의 2차정회원 부가질량계수 그리고 V_z 는 각 단면의 수정된 상대 수직속도를 의미한다. 수정된 상대수직속도 V_z 는 식(8)로 정의된다.

$$V_z = C_D \alpha'_{w3} - (\dot{x}_3 - x \dot{x}_5 + U x_5) \quad (8)$$

여기서 C_D 는 수정 계수, α'_{w3} 는 단면에서 입사파의 수직속도, \dot{x}_3 는 상하동요 속도, \dot{x}_5 는 종동요 속도 그리고 x_5 는 종동요를 의미한다. 수정계수 C_D 는 NMRI 단파장 보정식의 반사계수 C_R 을 이용하여 식(9)과 같이 정의된다.

$$C_D = 1 - \frac{\pi I_1 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right) + K_1^2 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right)}} \quad (9)$$

여기서 I_1 와 K_1 은 1종 수정된 베셀함수 2종 수정된 베셀함수를 의미한다. 그리고 d 는 선체의 흘수, g 는 중력가속도를 의미한다.

NMRI 단파장 보정법(Kuroda et al., 2008)은 일본의 NMRI(National Maritime Research Institute)에서 실험을 통해 얻어진 계수를 적용하여 단파장 영역의 부가저항식을 개발하였고 식 (10)과 같다.

$$R_{awR} = \frac{1}{2} \rho g (A C_R)^2 B B_f (1 + C_u F_n) \quad (10)$$

where

$$B_f = \frac{1}{B} \left[\int_I \sin^2(\theta - \beta) \cdot \sin(\theta) dl + \int_{II} \sin^2(\theta + \beta) \cdot \sin(\theta) dl \right]$$

$$C_R = \frac{\pi I_1 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right) + K_1^2 \left(\frac{\omega_e^2 d}{g} \right)}}$$

$$C_u = \begin{cases} -310 B_f + 68 & \text{for } B_f < 58/310 \\ 10 & \text{for } B_f \geq 58/310 \end{cases}$$

여기서 A 입사파의 진폭, B 는 선폭(Beam) 그리고 F_n 푸르드 수를 의미한다. B_f 의 수선 적분 구간은 Fig. 4와 같다.

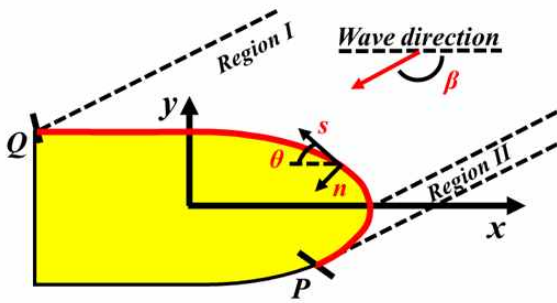


Fig. 4 Coordinate system for added resistance in short waves

수정된 방사에너지법과 NMRI 단과장 보정법으로 계산된 파랑 중 부가저항의 R.A.O와 식 (11)을 이용하여 불규칙 해상 상태에서의 파랑 중 부가저항 $\overline{R_{aw}}$ 을 계산할 수 있다.

$$\overline{R_{aw}} = 2 \int_0^\infty \left| \frac{R_{aw}(\omega)}{A^2} \right| \cdot S_A(\omega) d\omega \quad (11)$$

여기서 $S_A(\omega)$ 는 불규칙 해상상태를 정의하는 스펙트럼으로 본 연구에서는 ITTC 1978에서 제안한 표준스펙트럼인 Bretschneider 스펙트럼을 식 (12)와 같이 적용하였다.

$$S_A(\omega) = \frac{173 \cdot H_{1/3}^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left(\frac{-692}{T_1^4} \cdot \omega^{-4}\right) \quad (12)$$

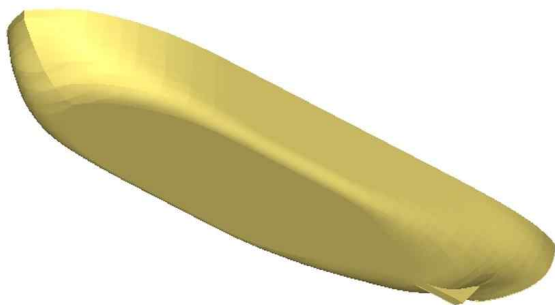


Fig. 5 Three dimensional geometry of hull

3. LNG 병커링 바지의 예인력 계산

3.1 대상선 및 해석 조건

본 연구에서는 설계가 진행 중인 LNG 병커링 바지의 예인력을 계산하였다. LNG 병커링 바지의 3 차정회원 형상은 Fig. 5와 같으며 주요제정회원은 Table 1과 같다. 운항선속은 8 knots로 Table 2와 같은 조건에 대하여 계산을 수행하였다.

Table 1 Particulars of LNG bunkering barge

Item	Unit	Design condition
LBP	[m]	43.0
B	[m]	11.0
TF	[m]	2.4
TA	[m]	2.4
Displacement	[m ³]	918.5
Wetted surface area	[m ²]	577.0
k_{vy}	[L]	0.25

Table 2 Ship speeds of LNG bunkering barge

Fn[-]	Speed[knots]
0.175	7.0
0.188	7.5
0.200	8.0
0.213	8.5
0.225	9.0

3.2 LNG 병커링 바지의 정수 중 저항

정수 중 저항계산은 2장에서 언급한바와 같이 조파저항과 형상계수를 고려한 마찰저항으로 나눌 수 있다. 형상계수를 고려한 마찰저항은 식(3)과 (4)를 이용하여 계산된다. 조파저항의 경우, Rankine source method를 이용하였으며 계산에 사용된 패널은 Fig. 6과 같이 구성하였다.

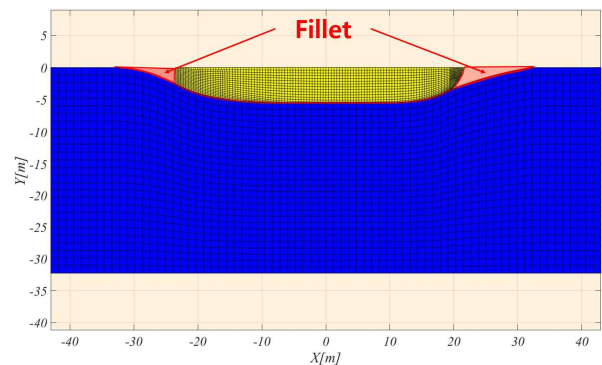


Fig. 6 Panel model for LNG bunkering barge

선체에는 2153개, 자유수면에는 1944개를 배치하였다. LNG 병커링 바지의 경우, 선수의 수선면 형상이 완만하며 선미 트랜섬이 있기때문에 별도의 격자조정이 필요하다. 본 연구에서는 Peng et al.(2014)에 의해 제안한 선미의 fillet을 자유수면의 선수와 선미에 Fig. 6과 같이 2차 피팅함수로 설정하였다.

계산된 자유수면의 패턴은 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯 선속이 증가함에 따라 선수미회파가 커짐을 확인할 수 있다.

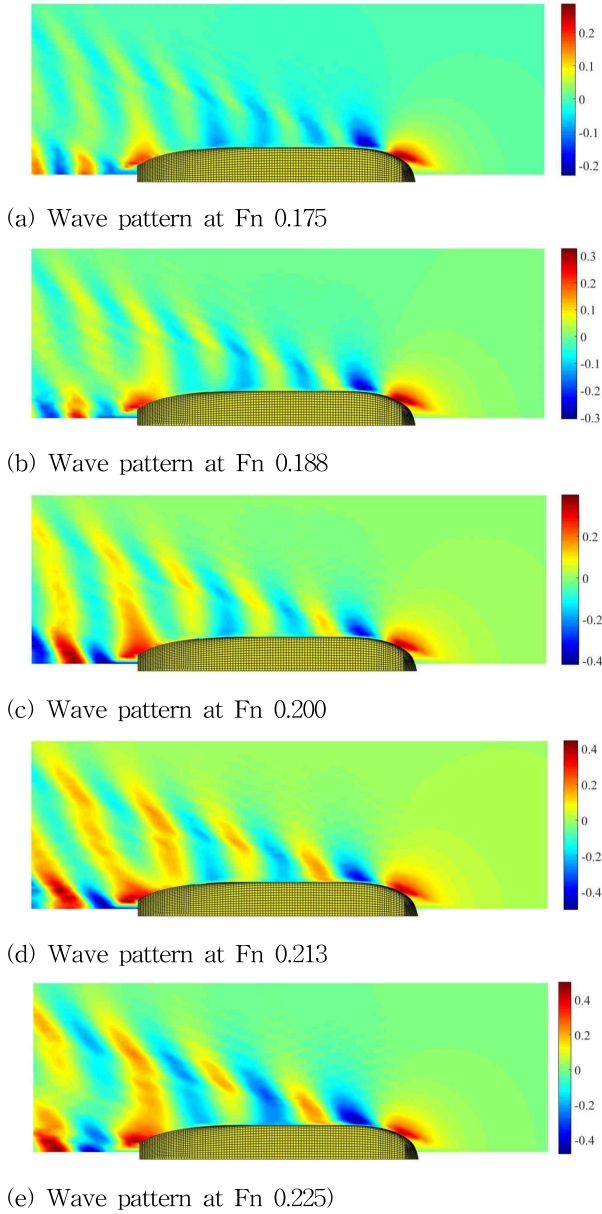


Fig. 7 Calculated wave pattern of LNG bunkering barge

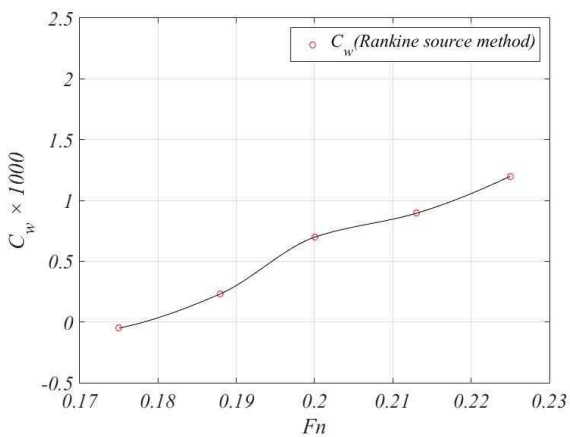


Fig. 8 Wave resistance coefficients of LNG bunkering barge

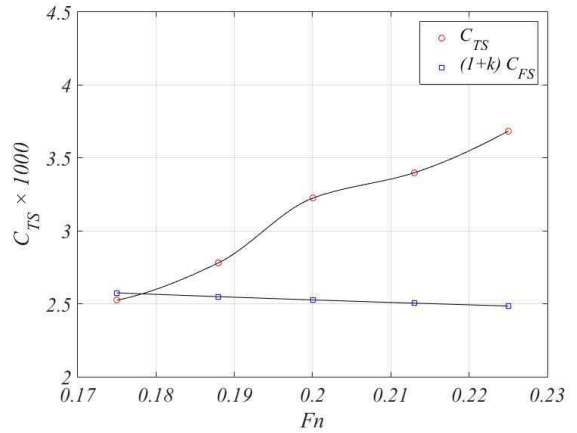


Fig. 9 Total resistance coefficients of LNG bunkering barge

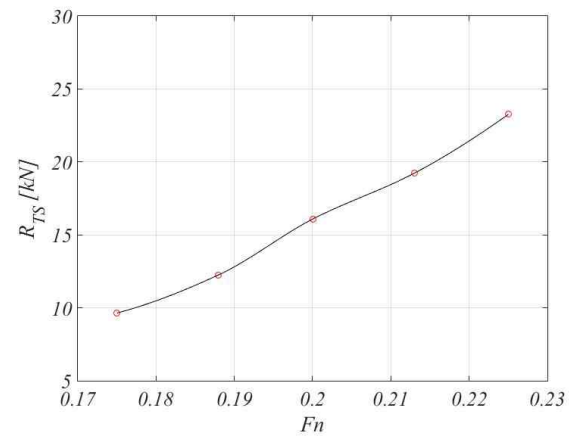


Fig. 10 Total resistance on LNG bunkering barge

조파저항 계수는 Fig. 8에 나타내었고 조파저항 계수 역시 선속이 증가함에 따라 증가하였다. ITTC 1978 방법을 이용하여 형상계수를 고려한 마찰계수와 전저항계수를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10은 실선 저항으로 LNG 병커링 바지의 운항선속인 8 knots에서 약 16 kN의 정수 중 예인력이 필요한 것으로 추정되었다. Fig. 9를 통해 운항선속 8 knots에서 저항곡선이 hump에 위치함을 확인하였고 효율적인 운항을 위해 운항선속을 조정해야할 필요가 있을 것으로 판단된다. 계산된 저항계수와 실선저항을 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Resistance of LNG bunkering barge

Speed[knots]	$C_w \times 10^3$	$C_{FS} \times 10^3$	$C_{TS} \times 10^3$	R_{TS} [kN]
7.0	-0.050	2.027	2.525	9.643
7.5	0.233	2.006	2.782	12.260
8.0	0.697	1.989	3.224	16.082
8.5	0.895	1.971	3.399	19.230
9.0	1.199	1.956	3.684	23.258

3.3 LNG 병커링 바지의 파랑 중 부가저항 계산

본 연구에서는 STF 스트립 방법(Salvesen et al., 1970)을 이용하여 파랑 중 부가저항 계산에 사용될 LNG 병커링 바지의 운동을 계산하였다. 스트립 방법은 3차정회원의 동유체력 계산을 위해 3차정회원 선체를 Fig. 11과 같이 2차정회원 단면에 대한 문제로 치환하여 계산한다. 2차정회원 단면의 동유체력 계산을 위하여 desingularized indirect boundary integral equation method를 사용하였다. NMRI 단파장 보정법 계산을 위한 수선(water line) 모델은 Fig. 12와 같다.

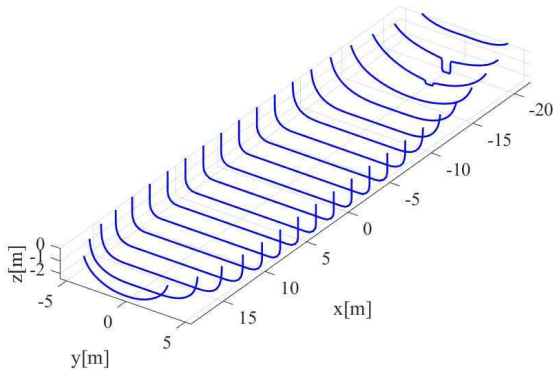


Fig. 11 Section model for strip method

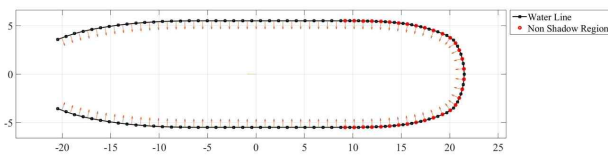


Fig. 12 Water line model for shortwave correction method of NMRI

계산된 운동 R.A.O는 Fig. 13과 14에 도시하였다. 선속이 증가함에 따라 LNG 병커링 바지의 상하동요와 종동요가 증가함을 확인할 수 있다. LNG 병커링 바지의 파랑 중 부가저항 역시 선속이 증가함에 따라 증가함을 Fig. 15에서 확인할 수 있다. 본 결과를 통해 선속 증가가 LNG 병커링 바지의 수직 상대운동의 증가를 일으키며 이는 파랑 중 부가저항의 증가로 이어짐을 확인하였다. 수직 상대운동은 상하동요, 종동요 그리고 자유수면 높이의 조합으로 계산되며 회전중심에서 멀수록 종동요의 기인한 수직운동이 크게 반영된다. 이러한 사실에서 부가저항의 상하동요보다 종동요의 영향이 지배적임을 간단히 추론할 수 있다.

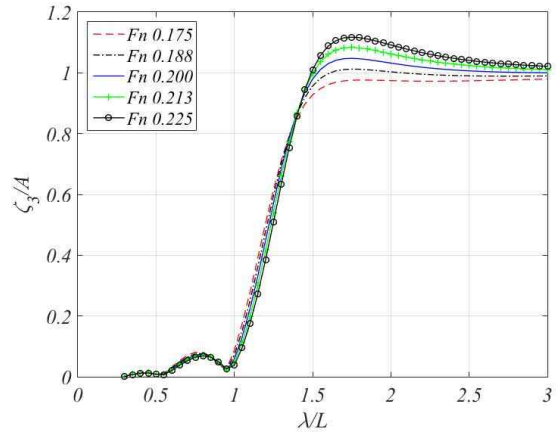


Fig. 13 Heave R.A.O of LNG bunkering barge in head wave

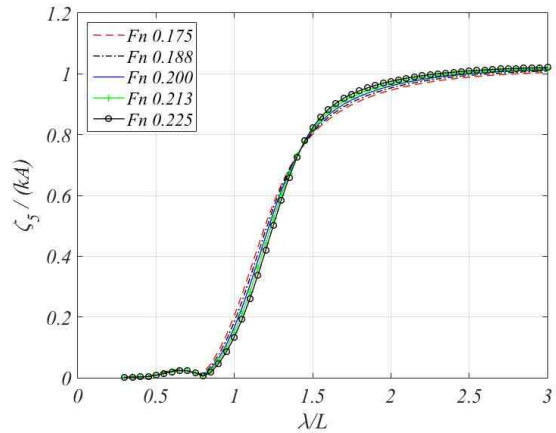


Fig. 14 Pitch R.A.O of LNG bunkering barge in head wave

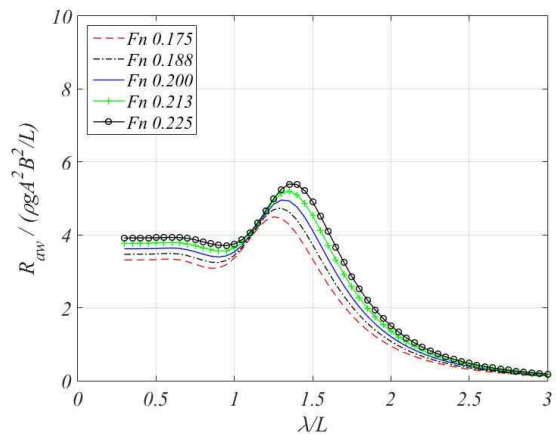


Fig. 15 Added resistance in wave of LNG bunkering barge in head wave

Table 4 Added resistance in irregular waves of LNG bunkering barge

Speed [knots]	Fn [-]	R _{aw} at S.S.3	R _{aw} at S.S.4	R _{aw} at S.S.5
		[kN]	[kN]	[kN]
		Hs 0.88m Tp 7.5s	Hs 1.88m Tp 8.8s	Hs 3.25m Tp 9.7s
7.0	0.175	6.037	18.632	41.633
7.5	0.188	6.454	20.027	44.846
8.0	0.200	6.857	21.385	47.987
8.5	0.213	7.268	22.786	51.236
9.0	0.225	7.663	24.140	54.387

불규칙 해상상태에 따른 파랑 중 부가저항은 식(11)과 파랑 중 부가저항 R.A.O를 통해 계산할 수 있으며 Table 4에 나타내었다. 선속과 파고의 증가에 따라 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항이 증가함을 확인할 수 있다. 운항선속 8 knots를 기준으로 해상상태 3(Sea State 3, S.S.3)에서 파랑 중 부가저항은 정수 중 저항 대비 약 43% 정도 발생하며 해상상태 4(S.S.4)에서는 정수 중 저항 대비 약 133% 까지 증가함을 확인할 수 있다.

3.4 LNG 병커링 바지의 예인력

기 계산된 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항을 기반으로 LNG 병커링 바지의 예인력을 추정할 수 있다. 선속과 해상상태의 따른 예인력은 Table 5와 같다. 해상상태 4에서 운항한다고 가정할 때 운항선속 8 knots에서 발생하는 예인력은 37.467 kN으로 추정된다.

Table 5 Total towing force of LNG bunkering barge

Speed [knots]	R _{total} at S.S.3 [kN]	R _{total} at S.S.4 [kN]	R _{total} at S.S.5 [kN]
7.0	15.68	28.275	51.276
7.5	18.714	32.287	57.106
8.0	22.939	37.467	64.069
8.5	26.498	42.016	70.466
9.0	30.921	47.398	77.645

3.5 선급 규칙과의 비교 및 민감도 테스트

부선의 예인력을 추정하는 계산법은 미해군에서 개발된 추정식(U.S. Navy, 2002)과 선급의 부선 규칙(KR, 2014)이 있으며 그 외의 방법은 일부 기관의 경험으로 만들어져 접근이 제한적이다. 그리고 상기 두 방법 또한 Kim et al.(2013)에 의하면 동일한 것으로 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 선급의 부선 규칙에 대하여 한정하여 기 계산된 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항을 비교 검토하였다. 우선 정수 중 저항을 검토해보면, 운항선속 8 knots에서 선급규칙을 통하여 계산된 평균

마찰저항과 조파저항의 합은 177.0 kN으로 본 연구에서 계산된 정수 중 저항 16.1 kN과 약 11배 이상 차이가 발생한다. 이를 통해 선급 규칙은 현장 상황을 신속하게 반영하기에는 용이하지만 바지선의 예인력 또는 저항성능을 과대평가할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 추진기 탑재 및 개조가 계획된 본 LNG 병커링 바지에는 일반 선박과 같은 저항추정법으로 추정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 부가저항 또한 선급 규칙에서 명시되어 있으나 선박의 제정회원을 고려하지 않고 유의과고에 따라 일정한 값을 Table 6과 같이 제시하고 있다.

Table 6 Added resistance of barge (KR, 2014)

Hs [m]	Added resistance	
	[ton]	[kN]
1.5	1.0	9.807
3.0	5.5	53.939
4.5	10.0	98.070
6.0	14.0	137.298
7.5	16.0	156.912

Table 4에 계산된 파랑 중 부가저항의 결과를 살펴보면 고정된 유의과고에서 선속에 따라 파랑 중 부가저항이 변화하지만 선급 규칙은 이를 반영하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 선박의 제정회원 및 형상 정보가 계산에 사용되지 않기 때문에 오차가 발생할 여지가 많다. 따라서 선속 이외의 부가저항에 큰 영향을 준다고 알려진 선수 수선면 형상과 관성반경에 대한 민감도 테스트를 추가적으로 수행하였다. 우선 선수 수선면의 FP 지점을 0.25m 간격으로 증가시켜 Fig. 16의 다양한 선수 수선면의 형상들을 생성하였다. 그리고 생성된 수선면들의 형상을 반영한 파랑 중 부가저항을 계산하였다.

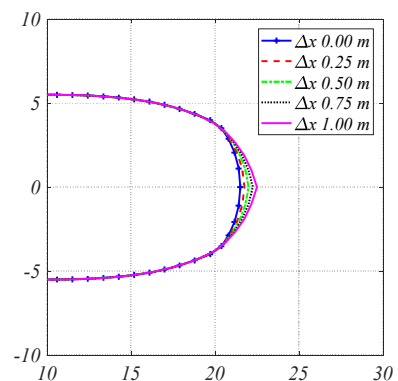


Fig. 16 Bow shape at water plane for sensitivity test

FP 지점의 증가거리가 길어질수록 선수 수선면 형상이 날렵해짐을 의미한다. 수선면 증가에 따른 배수량의 변화는 미소하여 무시하였고 무차정회원을 위한 증가된 LBP는 계산 및 비교의 편의를 위하여 FP 지점의 증가거리가 0m인 LBP와

동일하다고 가정하였다. 계산에 사용된 선속은 운항선속 8 knots로 고정하였다. 선수 수선면 형상 변화에 따른 파랑 중 부가저항의 R.A.O는 Fig. 17에 도시하였다. 선수 수선면의 형상이 날렵할 수록 단파장 영역의 부가저항이 감소함을 확인할 수 있다. 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항을 해상상태 4에 대하여 계산하였다. Fig. 17에서 해상상태 4의 스펙트럼의 범위를 확인할 수 있으며 소형선박인 LNG 병커링 바지의 경우, 장파장 영역에 상대적으로 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 계산된 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항을 Table 7에 나타내었고 기존 대비 최대 6.7% 감소함을 확인하였다.

Table 7 Added resistance in irregular waves according to the variation of the bow shape at water plane

Extended length [m]	Raw at S.S.4 (Hs 1.88m, Tp 8.8s) [kN]
0.00	21.385
0.25	21.032
0.50	20.691
0.75	20.331
0.10	19.957

관성반경은 파랑 중 운동성능에 영향을 주는 요인으로 알려져있다. 따라서 관성반경 k_{yy} 를 0.025L 간격으로 0.2L에서 0.3L까지 변화시켜가며 LNG 병커링 바지의 파랑 중 부가저항을 관찰하였다. 계산선속 또한 8 knots로 고정하였다. 관성반경 변화에 따른 파랑 중 부가저항 R.A.O를 Fig. 18에 도시하였다. 관성반경이 커질수록 LNG 병커링 바지의 상대운동에 기인한 부가저항 영역이 커짐을 확인할 수 있다. 이는 LNG 병커링 바지의 운동이 증가함에 따라 발생하는것으로 Fig. 19와 20의 상하동요와 중동요 변화를 통해 확인할 수 있다. 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항 역시 해상상태 4에 대하여 계산하여 Table 8에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 해상상태 4에서 소형선박인 LNG 병커링 바지는 장파장영역의 영향을 크게 받기때문에 부가저항의 증감이 최대 19%까지 발생하였다. 소형선박인 LNG 병커링 바지의 파랑 중 부가저항의 경우, 선수 수선면의 형상보다 관성반경의 변화에 더욱 민감히 변화하는 것을 확인하였다. 따라서 연안을 운항하는 부선의 경우, 규모가 중소형이기 때문에 정확한 관성반경을 통한 신뢰성있는 파랑 중 부가저항 계산이 필요한 것으로 판단된다.

Table 8 Added resistance in irregular waves according to the variation of the radius of gyration

Radius of gyration [L]	Raw at S.S.4 (Hs 1.88m, Tp 8.8s) [kN]
0.200	18.146
0.225	19.649
0.250	21.385
0.275	23.309
0.300	25.342

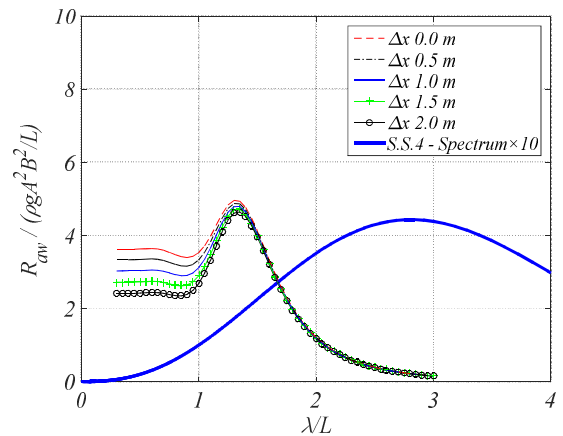


Fig. 17 Sensivity test of added reistance according to the variation of the bow shape at water plane

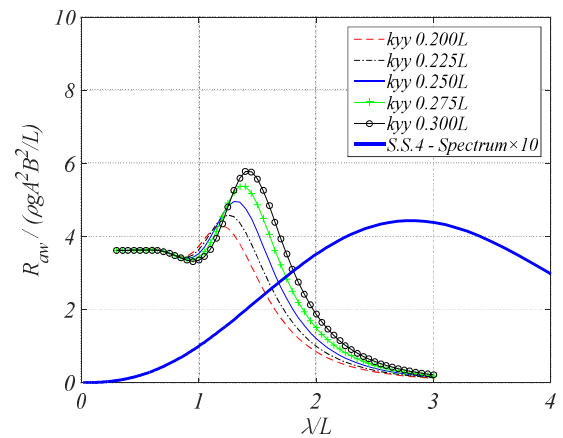


Fig. 18 Sensivity test of added reistance according to the variation of the radius of gyration

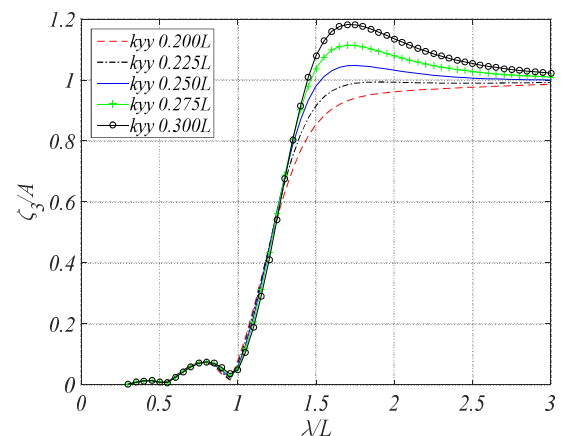


Fig. 19 Heave R.A.O according to the variation of the radius of gyration

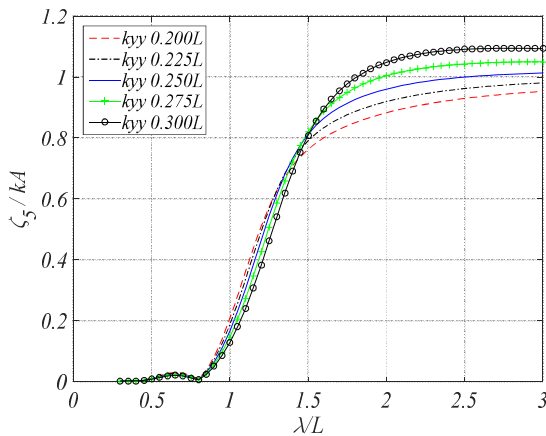


Fig. 20 Pitch R.A.O according to the variation of the radius of gyration

4. 결 론

본 논문에서는 ship to ship LNG 병커링을 위한 LNG 병커링 바지의 예인력을 추정하기 위하여 정수 중 저항 및 파랑 중 부가저항을 계산하였다. 실선의 정수 중 저항을 추정하기 위해 ITTC 1978 방법을 사용하였다. 조파저항 성분은 Rankine source method 기반의 수치코드를 개발하여 계산하였고, 점성저항 성분은 형상계수와 ITTC 1957 모형선-실선 상관공식을 이용하여 산정하였다. 파랑 중 부가저항은 NMRI 단파장 보정이 고려된 수정된 방사에너지법을 사용하여 부가저항의 R.A.O를 계산하였고 이를 이용하여 불규칙 해상상태의 파랑 중 부가저항을 추정하였다. LNG 병커링 바지가 해상상태 4에서 운항한다고 가정할 때 운항선속 8 knots에서 발생하는 예인력은 37.5 kN으로 약 3.8 ton 으로 추정된다. 추가로 본 연구에서 계산된 결과를 선급 규칙과 비교 검토하였고 LNG 병커링 바지의 선수 수선면의 형상과 관성반경의 변화에 따른 파랑 중 부가저항민감도 테스트를 수행하였다. 관련 결과 분석을 통해 아래 결론을 도출하였다.

(1) 정수 중 저항의 경우, 운항선속 8knots에서 선급 규칙과 비교하여 약 11 배 이상 큰 차이가 남을 확인하였다. 이는 간단한 간이식인 선급 규칙을 통해 현장 상황을 신속하게 반영하기 용이하지만 큰 오차를 가지므로 목적에 맞는 적절한 예인력 계산법의 선택이 필요하다고 판단된다.

(2) 파랑 중 부가저항의 경우, 선급 규칙은 유의파고에 대한 일정한 부가저항을 가지기 때문에 선속의 변화에 대한 파랑 중 부가저항의 변화를 반영하지 못하며 부선의 제정회원 및 형상 또한 반영되지 않기 때문에 오차가 발생할 가능성이 많은 것으로 판단된다.

(3) 선수 수선면의 형상 변화의 경우, 수선면의 형상이 날렵할수록 단파장 영역의 부가저항이 감소함을 확인하였다. 관성반경의 변화의 경우, 선박의 상대운동에 기인한 부가저항의

증가에 영향을 주며 관성반경이 줄어들수록 부가저항이 감소됨을 확인하였다.

(4) 해상상태 4를 기준으로 소형선박인 LNG 병커링 바지의 파랑 중 부가저항은 장파장영역의 영향을 받기때문에 수선면의 형상변화보다 관성반경의 영향에 더욱 민감하게 변함을 알 수 있다. 따라서 연안을 운항하는 부선의 규모가 중소형임을 감안할때 신뢰성있는 파랑 중 부가저항을 계산하기 위해서는 정확한 관성반경 정보를 파악하여 추정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

References

- [1] Ahn, B. K. and Lee, S. M.(2010), "Study on the Added Resistance of Barge in Waves", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 10, pp. 741-746.
- [2] Bertram, V.(2011), Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann, pp. 1-390.
- [3] Gerritsma, J. and Beukelman, W.(1972), "Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship", International Shipbuilding Progress, Vol. 19, pp. 285-293.
- [4] ITTC(2017), ITTC - Recommended Procedure 7.5 - 02 - 03 - 01.4, p. 15.
- [5] Kajitani, H., Miyata, H., Ikehata, M., Tanaka, H., Adachi, H., Namimatsu, M. and Ogiwara, S.(1983), "The Summary of the Cooperative Experiment on Wigley Parabolic Model in Japan," Proc 2nd DTRC Workshop Ship Wave-Resist Comput, DTNSRDC, pp. 5 - 35.
- [6] Kim, E. C., Choi, H. J. and Lee, S. G.(2013), "A Study on the Hull Resistance Prediction Methods of Barge Ship for Towing Force Calculation of Disabled Ships", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 16, No. 3, pp. 211-216.
- [7] Korean Register(2014), "Rules for the Towing Survey of Barges and Tugboats", p. 12.
- [8] Kuroda, M., Tsujimoto, M., Fujiwara, M. and Takagi, M.(2008), "Investigation on Components of Added Resistance in Short Waves", Journal of the Society of Naval Architects and Ocean Engineering, Vol. 8, pp. 171-176.
- [9] Nam, T. K., Jung, C. H. and Jung, J. S.(2012), "A Study on the Calculation of Resistance of the Ship to be Towed and Towline Tension", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 8, pp. 607-612.
- [10] Nam, T. K., Jung, C. H., Kim, J. M. and Choi, H. J.(2014), "A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments", Journal of

Navigation and Port Research, Vol. 38, No. 5, pp. 463-470.

- [11] Oh, S. and Yang, J. H.(2015), "A Study on Estimation of Added Resistance in Waves using Modified Radiation Energy Method and Short Wave Correction Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 53, No. 1, pp. 62-68.
- [12] Peng, H., Ni, S. and Qiu, W.(2014), "Wave Pattern and Resistance Prediction for Ships of Full Form", Ocean Engineering, Vol. 87, pp. 162-173.
- [13] Salvesen, N., Tuck, E. O. and Faltisen, O.(1970), "Ship Motions and Sea Loads", Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions, Vol. 78, pp. 250-287.
- [14] U. S. Navy(2002), "U. S. Navy Towing Manual", SL740-AA-MAN-010.
- [15] Van Oortmerseen, G.(1971), "A Power Prediction Method and its Application to Small Ships", International Shipbuilding Progress, Vol. 12, pp. 397-415.

Received 26 October 2018
Revised 12 November 2018
Accepted 12 November 2018