



수심 변화에 따른 볼라드 당김 및 과부하 조건에서의 다중 포드 추진 쇄빙선박의 여유추력 추정에 대한 수치해석적 연구

김진규¹ · 김형태^{2,†} · 김희택¹ · 이희동¹
삼성중공업¹
충남대학교 선박해양공학과²

Study on Prediction of Net Thrust of Multi-Pod-Driven Ice-Breaking Vessel Under Bollard Pull and Overload Conditions According to the Change of Water Depth Using Computational Fluid Dynamics-Based Simulations

JinKyu Kim¹ · Hyoung-Tae Kim^{2,†} · Hee-Taek Kim¹ · Hee-Dong Lee¹
Samsung Heavy Industries Co., Ltd.¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University²

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.

In this paper, a numerical analysis technique using a body force model is investigated to estimate the available net thrust of multi-pod-driven ice-breaking vessels under bollard pull and overload conditions. To employ the body force model in present flow simulations, drag and thrust components acting on the pod unit are calculated by using Propeller Open Water (POW) test data. The available net thrusts according to the direction of operation are evaluated in both bollard pull and overload conditions under deep water. The simulation results are compared with the model test data. The available net thrusts, calculated by the present analysis for ahead operating modes at 3~6 knots which are typical speeds of the target vessel in arctic field, are agreed well with the model test results. It is also found that the present result for astern operating mode appears approximately 6 % larger than the model test result. In addition, the available net thrusts are calculated under the both operating conditions accompanied by shallow water effects, and the main cause of the difference is studied. Based on the result of the present study, it is confirmed that the body force model can be applied to the performance evaluation of multi-pod propulsion system and the main engine selection in early design stage of the vessel.

Keywords : Multi-pod propulsion(다중 포드 추진), Bollard pull condition(볼라드 당김 상태), Overload condition(과부하 상태), Net thrust(여유 추력), Shallow water effects(천수 효과)

1. 서론

수에즈 운하(Suez canal)를 경유하는 항로에 비하여 북극해를 지나는 북극 항로는 항해 일수와 물류비 측면에서 매우 유리해서 이를 이용하기 위한 쇄빙선박에 대한 수요 및 신조 상담이 증가하고 있다. 일례로, 삼성중공업에서 2020년 수주한 174K급

쇄빙천연가스운반선과 대우조선해양에서 2017년 인도한 15척의 쇄빙천연가스운반선은 ARC 7급을 만족하는 선박으로 쇄빙상선에 대한 요구 사양을 잘 보여주고 있다. 참고로, ARC 7급은 Russian Maritime Register of Shipping(RMRS)에서 정의한 non-Arctic ships, Arctic ship 그리고 Ice-breaker 중에서 Arctic ship (Rules for the classification and construction of

sea-going ships Part I, II & VII, 2016, 2019) 수준의 쇄빙기 능을 갖춘 상선에 해당하는 설계 조건을 가진다. 쇄빙선박은 일반 대양을 항해하는 기능과 더불어 북극 항로의 빙해수역을 운항하기 위한 기능을 동시에 갖춰야 하는 고사양 선박으로 초기 성능추정에 있어 일반상선 대비 복잡한 과정을 거치게 된다. 또한, 연간 수십 척 이상씩 발주되는 일반상선과 달리 운항 항로, 항구 그리고 유전 및 가스전 등의 대외 환경에 따라 각기 다른 제원을 가지는 선박 설계가 요구된다. 빙해역에서의 속도 추정을 위해서는 정확한 운항 속도별 여유추력(net thrust) 산정과 빙해수역 운항 환경에 따른 정도 높은 빙저항 추정이 필요하다. 즉, 쇄빙선박의 성능 추정을 위해서는 운항 속도 및 방향전, 후진) 그리고 흘수별 여유추력 산정을 위한 모형시험 및 다양한 빙상환경에서의 빙저항 추정을 위한 빙해수조시험이 추가로 수행되어야 한다.

빙해수조시험의 비용적, 시간적 제약을 해결하고 다양한 빙상 환경에서 빙저항을 추정하기 위한 연구가 다수 수행된 바 있다. 평탄 빙(level ice)에서의 선박에 작용하는 빙저항 추정에 관한 연구는 1960년대 후반부터 활발히 진행되어 다양한 경험식이 제안되었다 (Kashteljan et al., 1969). 최근에는, 깨진 빙 채널 폭과 빙편 크기에 따라 달라지는 내빙선박의 빙저항 추정에 대한 연구 사례도 발표된 바 있다 (Jeong et al., 2017; 2018).

하지만, 프로젝트 초기단계에서 요구되는 빙저항 추정은 기 개발 선박의 모형시험 결과와 제안된 실선 추정법을 일부 적용하는 수준으로, 설계 단계에서 빙저항을 정확히 추정할 수 있는 기반이 여전히 제대로 갖춰지지 못한 것이 엄연한 사실이다. 더불어, 빙해역에서 선박의 운항성능을 결정짓는 또 다른 요소인 운항 조건 및 속도 조건별로 여유추력을 추정하는 방법에 대한 연구 역시 미진한 실정이다. 최근에는 우수한 운항성능을 가지는 쇄빙선박에 대한 시장 요구에 부응하기 위해 기존 쇄빙상선보다 출력이 큰 추진장치 혹은 다중 추진 장치를 적용하는 선박의 개발이 요구되고 있어, 다양한 추진 장치 형태에 따른 적정 주기관 선정을 위해서도 여유추력을 정확하게 산정할 필요가 있다. 하지만, 프로젝트 초기단계에서 다양한 추진장치 후보군에 대해 블라드 당김 및 과부하 조건 시험을 모두 수행하는 것은 제한된 시간과 비용 측면에서 비현실적이다. 그러므로 여유추력을 정도 높게 추정하는 수치해석 방법을 찾는 노력이 절실히 요구된다.

2. 여유추력 평가 시험법

선박의 운항 속도, 방향 그리고 흘수에 따른 여유추력 산정은 선박이 정지 상태로 있는 블라드 당김 조건 및 저속 운항 조건에서 최대 출력으로 추진장치를 작동하여 추가적으로 견인력(tow force)을 발생시킬 수 있는 과부하 조건에서 평가를 통해 이루어진다.

블라드 당김 시험은 선속이 영이며, 출력이 최대일 때 포드 추진기(pod propulsor)가 낼 수 있는 최대 견인력 추정을 위해

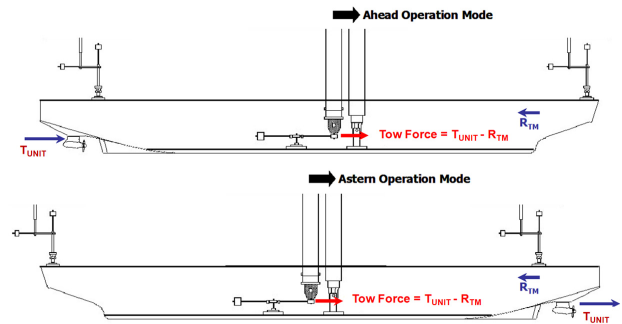


Fig. 1 Force diagram at ahead and astern operation modes

수행된다. 따라서 포드 추진기의 회전수(rps) 범위는 최대 출력을 내는 회전수가 반드시 포함되어야 한다. 예인수조시험시 모형선에 작용하는 힘(force diagram)들에 대해 전진 및 후진 운항 모드(ahead & astern operation modes) 각각에 대하여 Fig. 1에 나타내었다. 이때, 모형선의 전저항은 선속에 의해 유기되는 성분은 없고 단지 포드추진기 작동에 의해 발생하는 성분만 존재한다. 그러므로 포드 추진기가 작동할 때 저항 동력계에서 측정되는 힘(F)이 바로 모형선 스케일의 최대 견인력에 해당한다. T_{UNIT} 은 포드 유닛에서 생성되는 전체 추력을 나타내며, R_{TM} 은 운항 속도에서의 선체저항과 포드추진기 작동에 의한 선체저항 증가를 포함한 값을 나타낸다. 여기에 프루드 상사관계(Froude scaling)를 적용하여 실선 스케일의 견인력, 프로펠러 회전수(rps), 토크(torque) 및 전달마력(P_D)을 추정한다. 이후, 전달마력에 대한 견인력 값들을 곡선 적합(curve fitting)한 다음, 최대 출력 조건에서 보간(interpolation)하여 최대 견인력을 구한다.

과부하 시험은 선박이 최대 출력을 사용하여 일정한 선속으로 운항할 때, 포드 추진기가 빙저항을 극복하기 위해 낼 수 있는 최대 견인력을 선속별로 추정하기 위해 수행한다. 따라서 블라드 당김 시험과 마찬가지로 모형 포드 추진기의 회전수 범위는 최대 출력을 내는 회전수를 포함하여야 한다.

3. 수치해석 내용

다중 포드 추진 쇄빙선박의 여유추력 추정을 위해 블라드 당김 및 과부하 조건에서 운항 방향, 운항 속도 및 흘수를 바꾸어 가면서 해석을 수행하고, 실험 결과와의 비교를 통해 수치해석 방법의 유용성을 검증하고자 하였다. 이 때, 수치유동해석 도구는 Star-CCM+13.06을 사용하였다.

대상 선박은 다중 포드 추진 장치를 적용한 ARC7급 쇄빙선 연가스운반선으로 주요 제원은 Table 1과 같다.

수치계산을 위한 기본 좌표계로는 선체 길이 방향을 x축, 연직 상 방향을 z축, 폭 방향을 y축으로 하는 직교좌표계를 사용하였으며, 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중앙 횡단면(midship section) 그리고 선박의 흘수가 교차하는 점으로 정의하였다. 또한, 다중 포드 추진시스템에 의한 추진력을 실제로 가깝게 모사하기 위해 각 포드 추진기면 중심에 추가로

국부좌표계를 생성하였으며 이를 Fig. 2에 나타내었다.

지배방정식의 대류항과 확산항에 대해서는 2차 정도의 상류 차분법(upwind scheme)과 중앙차분기법(central difference scheme)을 적용하였다. 또한, 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력연성은 Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation(SIMPLE) 알고리즘을 난류모형으로는 Reynolds Stresses Model(RSM)을 사용하였다. 한편, 포드 추진기 회전에 의한 국부 유동장 변화와 선체 및 포드 추진기간의 상호 작용을 재현하기에는 한계가 있지만, 유동 모사보다는 선박의 운항 속도별 최대 견인력 계산이라는 목적을 고려하여 추진기는 체적력(body force) 모델로 대체하여 적용하였다.

수치 격자의 기하학적 형상은 H-type으로 구성하였으며, Cartesian trimmer mesh로 공간격자를 구성하고 벽함수(wall function) 사용과 함께 prism layer를 적용하였다. 심수(deep water) 조건에서의 계산영역은 수선간 길이(LBP)로 무차원화하여 Fig. 3과 같이 적용하였다. 이 때, 사용된 총 격자수는 6백만 개 수준이다. 천수(shallow water) 조건에서의 계산영역은 흡수면으로부터 바닥면까지 떨어진 거리 15m를 제외하고는 심수 조건과 동일하게 적용하였다. 포드 유닛 주변 격자계의 모습은 Fig. 4에 나타내었다.

한편, 경계층의 유속 분포는 벽면에 접해있는 첫 번째 격자계의 크기에 크게 의존한다는 것은 잘 알려진 사실이며 본 연구에서는 벽면에서 첫 번째 격자까지의 무차원 거리인 y^+ 를 약 50 정도 유지하도록 격자를 생성하였다. 그리고 수치해석은 비정상 유동 조건에서 수행하였다.

Table 1 Main particulars of ARC7 class LNG carrier

Main particulars		Full scale	Model scale
Length between perpendicular	[m]	284.80	8.544
Breadth	[m]	48.80	1.464
Design draft	[m]	11.70	0.351
Scale ratio	[-]	-	1/33.333

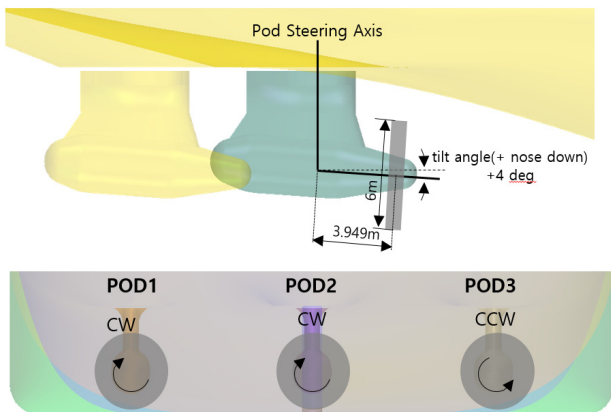


Fig. 2 Coordinate system

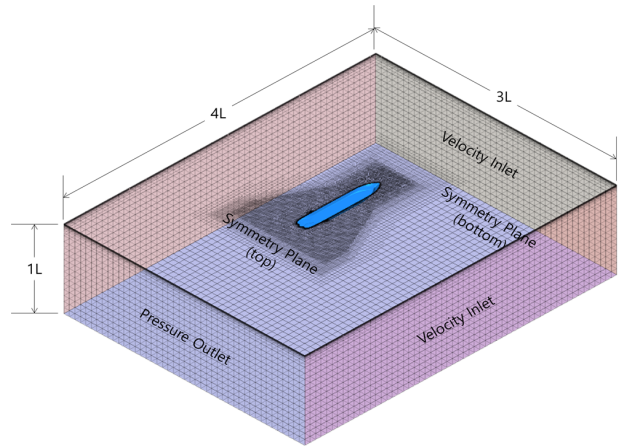


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions for simulation in deep water condition

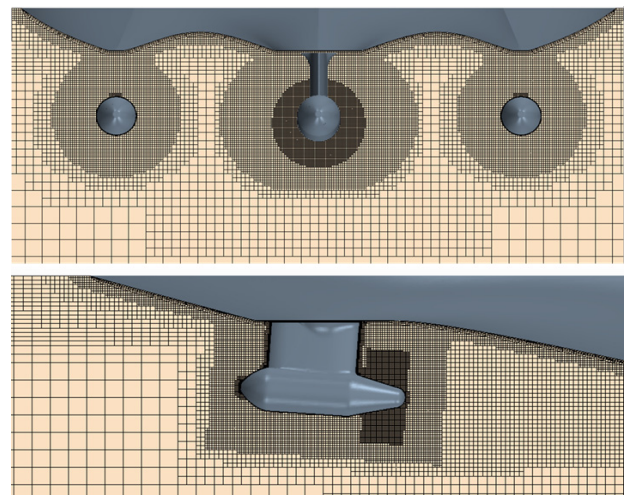


Fig. 4 Mesh distribution for pod unit to apply body force model

Fig. 3에 나타난 심수 상태에서 각 영역에 대한 경계조건은 다음과 같다. 입구면, 측면 및 바닥면에는 입구속도(velocity inlet) 조건을, 출구면에는 출구압력(pressure outlet) 조건을 적용하였다. 상부면과 바닥면에는 대칭유동(flow symmetry) 조건을 부여하였으며 선체와 포드하우징 표면에는 점착조건(no-slip)을 적용하였다. 한편, 블라드 당김 및 과부하 시험 특성을 고려할 때, 10노트 이하의 저속에서는 조파저항 성분이 포드 추진시스템의 자향해석에 미치는 영향이 미미하다고 판단하여, 선박의 설계 및 개발 초기단계에서 특수 추진장치의 적용에 대한 빠른 성능 검증을 위해 본 연구에서는 교란되지 않은 수면에 대칭조건을 적용해서 자향해석을 수행하였다.

4. Body force disk 모델과 유입류면 선정

블라드 당김 및 과부하 조건에서 포드 추진기 회전 날개에서

발생하는 추력 및 토크를 체적력 모델로 근사하여 해석하기 위해, 우선 포드 유닛의 추력 및 항력 성분에 대하여 검토하였다. 포드 추진기와 같은 특수 추진 장치의 경우, 선박의 추진 성능은 추진기-선체 간의 상호작용뿐만 아니라 추진기-포드 하우징 및 포드-선체 상호작용까지 포함시켜서 복합적으로 고려하여 결정된다. 이러한 관점에서 포드 유닛 전체를 하나의 추진기로 보고 추진기 단독시험(open water test)을 수행하는 것이 일반적이다.

포드 유닛이 단독시험 조건에서 작동할 때, 포드 유닛에 작용하는 항력 및 추력 성분들을 Fig. 5에 개략적으로 나타내었다. 먼저, 포드추진장치에 작용하는 항력은 작용하는 위치에 따라 포드바디 항력($K_{D_pod_body}$), 포드 스트럿 항력($K_{D_pod_strut}$), 스트럿-바디 접합부 필렛 형상에 의한 포드 하우징 간섭 항력, 포드 추진기 허브 및 캡 항력 그리고 포드 유닛의 고정부와 회전부 사이의 갭 항력이 있다. 또한, 추진기 작동으로 인해 부가적으로 발생하는 힘으로는 포드 추진기 날개와 포드 하우징 간의 상호작용에 의한 추진기 날개의 추력과 포드 스트럿, 포드 추진기 허브와 캡의 항력 등으로 구분할 수 있다.

추력 성분은 크게 포드 유닛 전체 추력(K_{T_unit})과 포드 유닛 고정부에 작용하는 항력을 제외한 포드 추진기 날개 및 회전부에 작용하는 순 추력($K_{T_pod_propeller}$)으로 구분할 수 있다. 포드 추진기 날개 및 회전부에 작용하는 순 추력을 단독시험을 통해 예측하고 체적력 모델의 입력 값으로 적용하면 선체 후방에서 포드 추진기가 작동하는 상태에서의 포드 유닛에 작용하는 전체 항력을 추정할 수 있다.

한편, 포드 유닛에 대한 단독시험을 통해 예측한 전체 및 순 추력 계수들과 토크 계수는 Fig. 6과 같으며, 이를 통해, 유입유동면의 축 방향 평균 유속과 날개 회전수에 해당하는 전진비에서의 추력 및 토크 계수로부터 선체 후방에서 작동하고 있는 포드 유닛에 작용하는 추력과 토크를 계산할 수 있다. 따라서 체적력 모델을 활용하여 볼라드 당김과 과부하 조건에서 예인수조 모형시험 결과와 유사한 추력과 토크를 생성하기 위해서는 평균 유속을 계산하는 ‘유입유동면(inflow plane)’을 적절히 선정하여 모형시험 조건과 유사한 포드 추진기 작동 환경을 모사

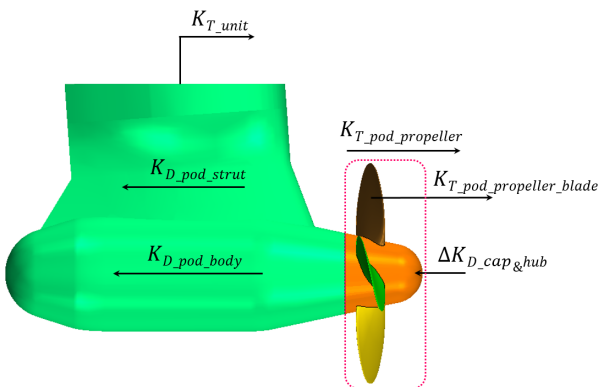


Fig. 5 Thrust and drag components of pod propulsion unit in propeller open water test condition

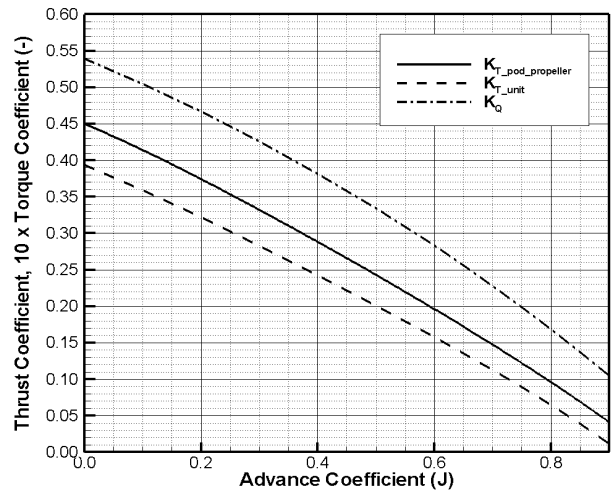


Fig. 6 Thrust and torque coefficients of pod unit and pod blade

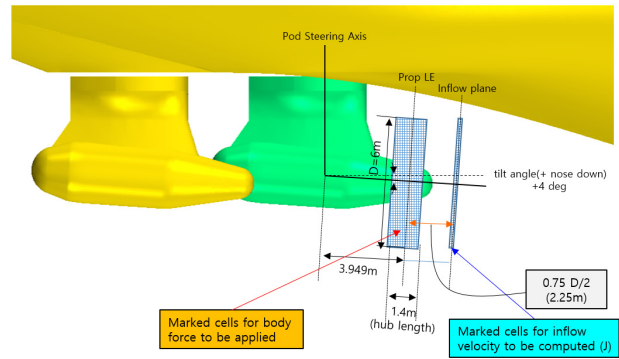


Fig. 7 Position of inflow plane

하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 추진기면으로부터 2.25m(포드 추진기 날개 직경의 37.5%) 떨어진 상류 위치에 유입유동면을 설정하고 운항 조건에 해당하는 전진비를 계산하여 그에 대응하는 추력과 토크를 생성하도록 하였다.

한편, 체적력은 Goldstein (1929)이 제안한 모델을 사용하였다. 이때, 추진기 축 방향 체적력 성분은 식 (1), 접선 방향 체적력 성분은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 날개 허브 직경에 의한 영향은 식 (3)에 의해 반영된다. 여기서 r 는 방사상 좌표, R_H 는 추진기 허브 반경 그리고 R_{Hp} 는 추진기 반경을 의미한다. 또한, A_x 와 A_θ 는 식 (4) 및 (5)와 같이 주어진다. 이때, T 는 추력, Q 는 토크, Δ 는 가상 디스크의 두께를 의미한다.

$$f_{bx} = A_x r^* \sqrt{1 - r^*} \quad (1)$$

$$f_{b\theta} = A_\theta \frac{r^* \sqrt{1 - r^*}}{r^* (1 - r'_h) + r'_h} \quad (2)$$

$$r^* = \frac{r' - r'_h}{1 - r'_h}, r'_h = \frac{R_H}{R_P} \text{ and } r' = \frac{r}{R_P} \quad (3)$$

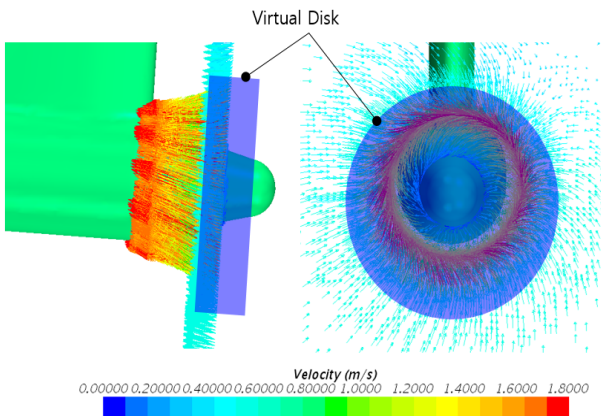


Fig. 8 Velocity vector on port side wing pod propeller plane

$$A_x = \frac{105}{8} \cdot \frac{T}{\pi \Delta (3R_H + 4R_P)(R_P - R_H)} \quad (4)$$

$$A_\theta = \frac{105}{8} \cdot \frac{Q}{\pi \Delta R_P (3R_H + 4R_P)(R_P - R_H)} \quad (5)$$

Fig. 8은 좌현 윙 포드의 체적력 모델에 생성된 속도벡터 분포로 체적력 모델에 의한 가속 회전류의 생성 모습을 잘 구현함을 확인할 수 있다.

5. 심수 영역에서의 여유추력 검토

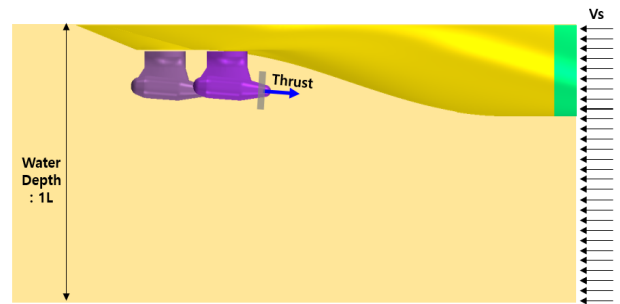
본 장에서는 심수 환경에서 블라드 당김 및 과부하 조건에서의 여유추력을 체적력 모델 기반의 수치해석을 통해 살펴보고 그 결과를 모형시험 결과와 비교하였다. 수치해석은 모형시험과 동일한 조건에서 수행하였으며, 모형선 주요제원에 대한 정보는 Table 1과 같다.

5.1 해석 조건

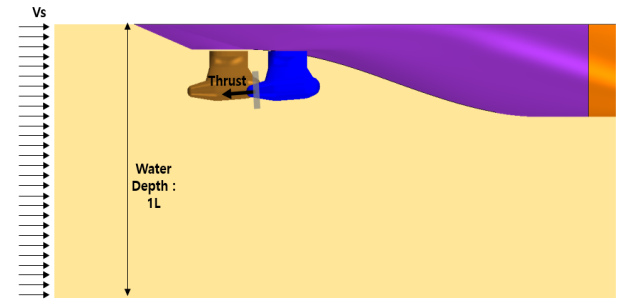
시험이 수행된 조건과 동일하게 선박이 정지하고 있는 블라드 당김 조건을 포함하여 총 4가지 속도 조건에서 전진 및 후진 후진 운항 모드 각각에 대해 수치해석을 수행하였다. 블라드 당김 및 과부하 조건에서 최대 견인력을 확인하기 위한 해석 조건은 Fig. 9 및 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Simulation cases to predict the maximum tow force

Free-stream speed (Vs, knots)	Operation mode	Propeller rps
0	ahead	4
		6
		8
		10
		12
3	astern	12
		14



(a) Ahead operation mode, deep water



(b) Astern operation mode, deep water

Fig. 9 Simulation conditions in deep water for ahead and astern operation modes at design draught

5.2 해석 결과

본 연구에 사용된 선박의 최대 엔진출력 조건에서 선박의 전진 운항 속도별 여유추력을 모형시험 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 여유추력은 포드 추진기의 전체 추력(K_{T-unit})에서 자항상태의 선체에 작용하는 전체 저항을 빼준 값으로, 해당 운항 조건에서 추가적으로 사용할 수 있는 추력을 의미한다. 정지 상태인 블라드 당김 조건의 경우에는 수치해의 수렴성을 고려하여 0.5노트의 전진 속도를 가지는 조건으로 해석을 수행하였다.

블라드 당김 조건에서부터 6노트까지는 전반적으로 수치해석 결과와 모형시험 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 선속이 점차 증가함에 따라 수치해석을 통한 여유추력 추정 결과는 실험 대비 크게 평가하고 있으며, 9노트에서는 모형시험 대비 약 5% 크게 평가하고 있다. 이는 본 연구의 수치해석이 선속의 증가에 따라 상대적으로 중요해지는 조파저항을 고려하지 못한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

운항 속도별 여유추력은 해당 선속을 유지하면서 추가로 발생시킬 수 있는 추력으로 선속이 증가함에 따라 선박의 저항 증가에 의해 감소하는 경향을 보이는 것은 잘 알려진 사실이다. 이에 반해, 빙저항은 주어진 빙상 환경에서 선속의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 가진다. 따라서 빙해수역 운항 속도를 높이기 위해서는 선속 증가에 따른 여유추력의 감소와 빙저항 증가를 동시에 극복할 수 있는 출력이 필요하다. 선속이 증가함에 따라 빙저항도 함께 증가하게 되는데 해당 운항 조건에서의 여유추력과 빙저항에 의해 선체에 작용하는 부가저항이 유사한 수준이 되는 조건이 운항 가능한 최대 선속이 된다.

최근에 건조되고 있는 쇠빙상선의 경우 3~6노트 목표 속도를 가지고 주기관 출력과 추진 장치를 선택하게 되고, 이 범위에서 수치해석을 통해 얻은 속도별 최대 여유추력은 모형시험 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이를 통해, 선박의 초기 설계 단계에서 추진 장치 형태 및 주기관 출력 선정 시, 체적력 모델을 활용하여 전진 운항시 선속별 여유추력을 예측하는 데에 큰 무리가 없음을 확인하였다.

후진 운항 조건에서의 선박 운항 속도별 여유추력을 모형시험 결과와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 전진 운항 조건과 달리 저속 구간을 포함하여 전반적으로 수치해석의 결과가 모형시험 대비 여유추력을 더 크게 예측하고 있다. 이에 대한 주된 원인은 크게 두 가지로 보인다. 첫째, 후진 운항의 경우에는 전진 운항과 달리 포드 추진기의 선회 후류가 선미부에 직접적으로 영향을 미쳐서 선체 저항을 증가시킨다. 하지만, 체적력 모델을 사용할 경우 이러한 선회 후류와 선체 간의 상호작용에 의한 효과를 정확하게 반영하지 못하여 선체 저항의 증가폭이

상대적으로 작게 발생해서 결과적으로 여유추력이 전진 운항 조건에 비해 전반적으로 증가한 것으로 판단된다. 둘째, 후진의 경우에는 전진에 비해 뭉툭한 선수 형상을 갖게 되어 상대적으로 큰 조파저항이 발생함에도, 본 연구에서는 교란되지 않은 수면에 대칭조건을 적용함으로써 조파저항을 고려하지 못한 것이 또 다른 원인으로 추정된다.

후진 운항 조건에서 수치해석을 통해 최대 견인력을 평가한 결과, 주요 운항속도인 3~6노트에서의 여유추력은 모형시험 대비 약 6% 크게 추정함을 확인하였다. 하지만 선속 증가에 따른 여유추력의 감소는 모형시험의 결과와 매우 유사한 경향을 보여주고 있으므로, 계산 결과의 정확도를 조금 더 개선할 수 있다면 선박 설계의 초기단계에서 포드추진장치 적용에 따른 여유추력 추정에 본 수치해석 방법을 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 천수 영역에서의 여유추력 검토

쇄빙선박의 경우 입항 항구의 접/이안 조건에 따라 천수 조건에서의 빙해역 운항 성능 확인이 추가로 요구된다. 천수 조건에서의 볼라드 당김 그리고 과부하 조건에서의 시험을 위해서는 일반적으로 심수 조건의 시험을 수행하는 예인수조(towing tank)에 천수 조건 환경을 별도로 만들어 주어야 한다. 이를 위해, 예인수조 전 구간에 천수 조건을 만들어주기 위한 구조물을 별도로 구비 해야하며 시험 시작 전/후에 천수판을 설치하고 철거해야하는 어려움이 존재한다. 이러한 관점에서, 수치해석적 접근은 이러한 문제를 해결하기 위한 좋은 수단이 될 수 있다.

본 장에서는 천수 영역에서 볼라드 당김 및 과부하 조건에서의 여유추력을 수치해석을 통해 살펴보고, 그 결과를 모형시험 결과와 비교함으로써 수심에 따른 특성을 검토하였다.

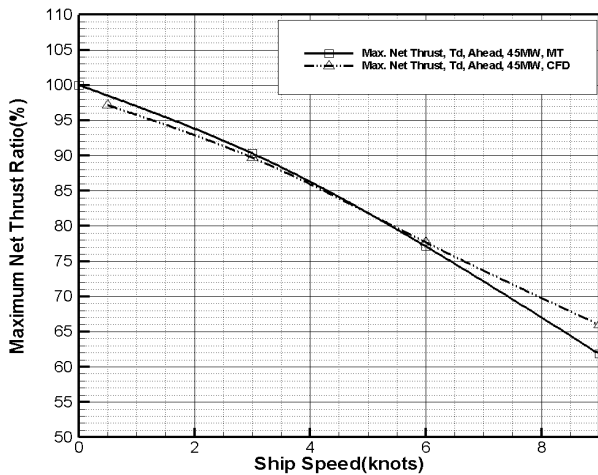


Fig. 10 Maximum net thrust ratio for ahead operation mode in deep water

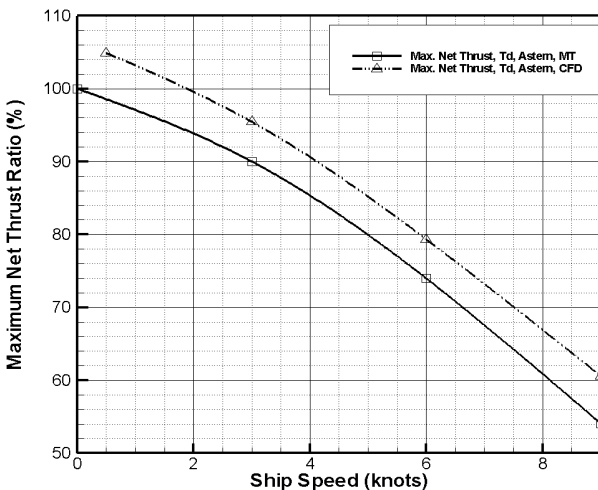


Fig. 11 Maximum net thrust ratio for astern operation mode in deep water

6.1 해석 조건

천수 조건에서의 수심과 전/후진시 포드 작동 방향은 Fig. 12에 나타내었으며, 선속 및 추진기 회전수 등에 대한 해석 조건은 심수 조건과 동일하게 적용하였다.

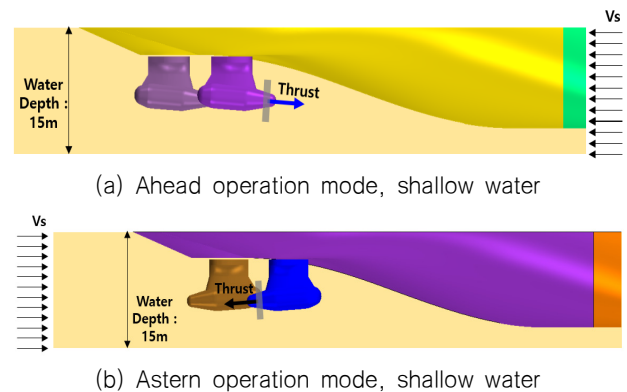


Fig. 12 Simulation conditions in shallow water for ahead and astern operation mode at design draught

6.2 해석 결과

선박의 천수 영역 운항 조건은 흘수선에서 15m 깊이이며 선박의 흘수를 고려하면 선체 바닥면과 해저면 사이의 거리는 약 3m로 제한된다. 이로 인해, 선체 하부를 지나는 유동은 가속되며, 이는 선체에 작용하는 압력 저항의 증가를 초래한다. 결과적으로 Fig. 13에 도시한 바와 같이 전진 운항 조건에서의 선속별 여유추력은 심수 조건에서의 결과와 비교하여 감소하게 된다.

전진 운항 조건에서 천수 효과에 의한 포드의 추력 증가 또는 감소 원인은 포드 위치에 따라 달라진다. 선속 6노트 조건에서 수심 변화에 따른 포드 위치별 유입 유속 및 벡터 분포를 비교하여 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 이 때, 유동장 정보는 포드 추진기면으로부터 포드 추진기 날개 직경의 50%인 3m 만큼 떨어진 위치에서 나타내었다. 먼저, 중앙 포드의 경우 추진

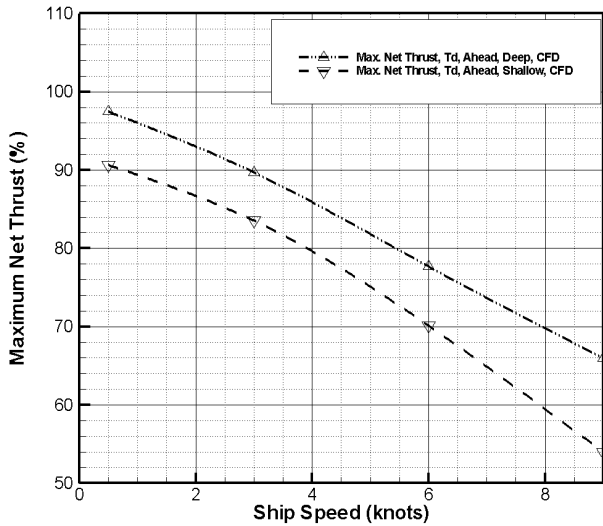


Fig. 13 Maximum net thrust ratio for ahead operation mode in shallow water

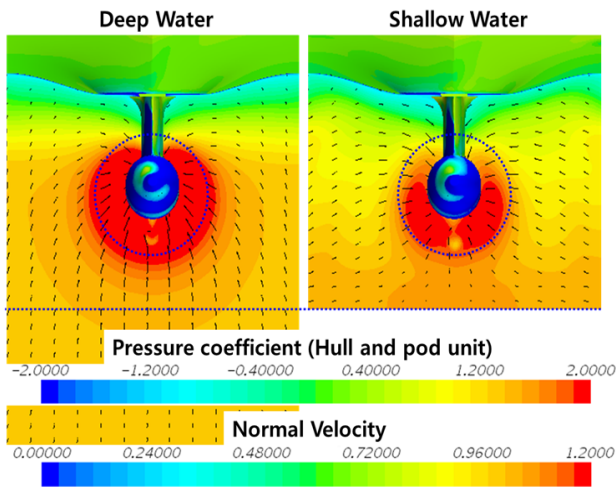


Fig. 14 Inflow velocity distribution and transverse vector at center pod plane for ahead operation mode in deep and shallow water conditions

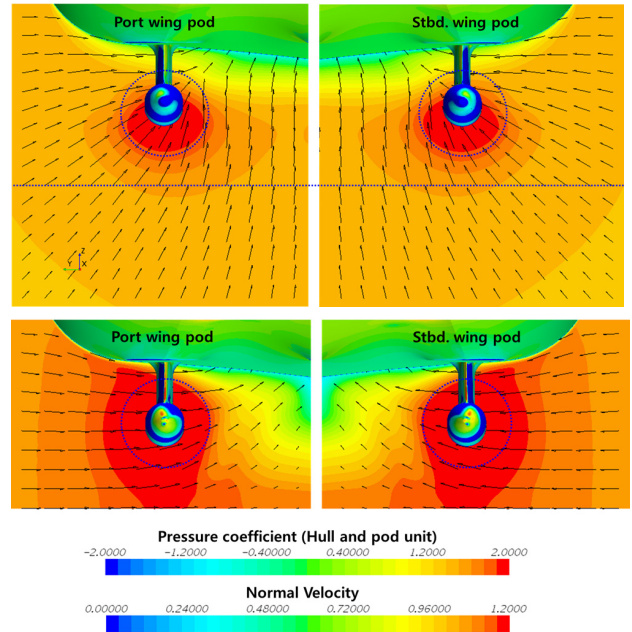


Fig. 15 Inflow velocity and transverse vector distributions at pod and starboard wing pod for ahead operation mode in deep and shallow water conditions

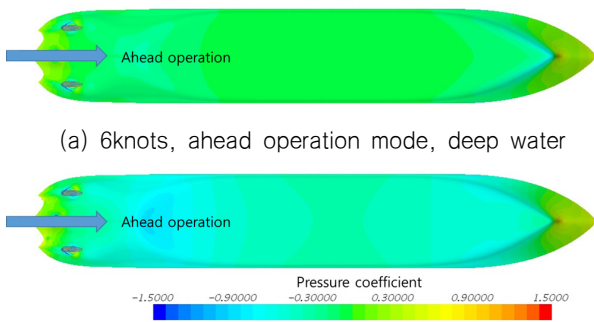
Table 3 Pod thrust differences between deep and shallow waters in ahead operation mode

Vs=6knots, rps=12	Deep water [A]	Shallow water [B]	Thrust difference [B]-[A]
Pod, Port	44.2N	46.4N	+2.2N
Pod, Center	44.8N	49.2N	+4.4N
Pod, Stbd	44.3N	46.4N	+2.1N
Total thrust	133.3N	142.0N	+8.7N

기면으로 유입되는 유속이 감소(wake 증가)되는 것을 확인할 수 있다. 이는 포드 추진기 날개의 추력 증가와 함께 포드 하우징의 저항 감소로 이어지며 결과적으로 중앙 포드 유닛의 전체 추력은 증가하게 된다.

윙 포드의 경우, 심수 조건 대비 유속 증가(wake 감소)로 인해 포드 추진기 날개의 추력이 감소한다. 이와 함께, 천수 효과에 의한 횡방향 속도의 증가로 포드 하우징 유닛의 저항이 감소한다. 하지만, 포드 추진기 날개의 추력 감소량 보다 포드 하우징 유닛의 저항 감소량이 더 커서 윙 포드 유닛의 전체 추력은 결과적으로 증가하게 된다. Table 3에 수심에 따른 포드 유닛 추력 변화를 선박 전진 속도 6노트, 추진기 회전수(rps)가 12인 조건에 대하여 비교하여 나타내었다.

앞서, 전진 운항시 수심 변화에 따른 유동장 변화를 통해 천수 조건에서 전체 포드 유닛 추력이 증가함을 확인하였다. 여유 추력의 경우에는 Table 4에 보인 바와 같이 천수 조건에서 운항 시, 선저에서의 유속 증가로 인해 발생하는 선체 저항 증가에 따라 심수 운항 대비 전체 여유추력이 감소됨을 확인할 수 있다. 수심 조건에 따른 선체 압력 분포 변화는 Fig. 16과 같다.



(a) 6knots, ahead operation mode, deep water

(b) 6knots, ahead operation mode, shallow water

Fig. 16 Pressure distribution for ahead operation mode in deep and shallow waters

Table 4 Thrust, resistance, pull force differences between deep and shallow waters in ahead operation mode

Vs=6knots, rps=12	Deep water [A]	Shallow water [B]	Difference [B]-[A]
Total thrust	133.3N	142.0N	+8.7N
Resistance	15.6N	30.1N	+14.5N
Pull force	117.7N	111.9N	-5.8N

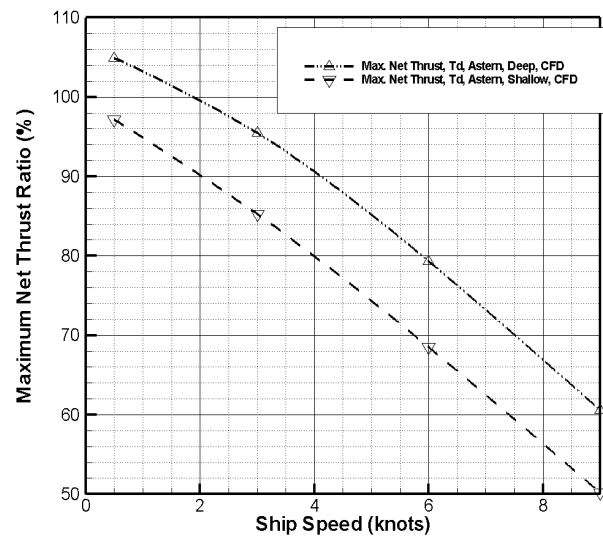


Fig. 17 Maximum net thrust ratio for astern operation mode in shallow water

후진 운항 시에서도 전진 운항 시와 마찬가지로 선속별 여유 추력은 천수 조건에서 감소하게 되며 그 결과는 Fig. 17에 보였다.

후진 선속 6노트 조건에서 수심 변화에 따른 유입 속도 및 벡터 분포를 비교하여 Fig. 18에 나타내었다. 이 때, 유동장 정보는 중앙 포드 추진기면으로부터 포드 추진기 날개 직경의 50%인 3m 만큼 떨어진 위치에서 나타내었다. 후진 운항 시의 천수 효과는 전진 운항 시와는 다르게, 중앙 및 윙 포드 영역에서

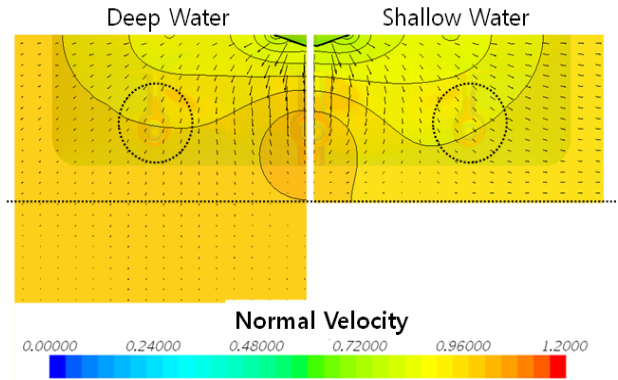


Fig. 18 Inflow velocity and transverse vector distributions at wing pod for astern operation mode in deep and shallow water conditions

Table 5 Pod thrust differences between deep and shallow waters in astern operation mode

Vs=6knots, rps=12	Deep water [A]	Shallow water [B]	Thrust difference [B]-[A]
Pod, Port	44.6N	45.8N	+1.2N
Pod, Center	45.7N	46.4N	+0.7N
Pod, Stbd.	44.8N	45.9N	+1.1N
Total thrust	135.1N	138.1N	+3.0N

유속 변화가 상대적으로 크지 않음을 확인하였다. 이로 인하여 포드 추진기 날개 추력 증가와 포드 유닛의 저항 감소량이 모두 줄어들게 되어 수심 변화에 따른 포드 유닛 추력 증가량이 Table 5에 보인 바와 같이 전진 운항 모드 결과와 비교하여 감소함을 확인할 수 있다.

앞서 후진 운항시 천수 운항 조건에 따른 포드로의 유입 유속과 방향 변화에 따른 전체 유닛 추력의 증가 경향을 살펴보았다. Table 6에 보인 바와 같이 선저면에서의 유속 증가에 따른 선체 저항 증가량이 전체 포드 유닛 추력 증가량보다 크게 증가하여 추력의 경우에는 감소하게 된다. 추가적으로 후진 운항 조건에서는 전체 포드 유닛 추력 증가량은 전진 운항대비 작지만 선체의 저항 증가량은 유사한 수준이다. 이로 인해, 여유추력 감소가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 수심 조건에 따른 선체 압력 분포 변화는 Fig. 19에 나타내었다.

Table 6 Thrust, resistance, pull force differences between deep and shallow waters in astern operation mode

Vs=6knots, rps=12	Deep water [A]	Shallow water [B]	Difference [B]-[A]
Total thrust	135.1N	138.1N	+3.0N
Resistance	32.6N	48.5N	+15.9N
Pull force	102.5N	89.6N	-12.9N

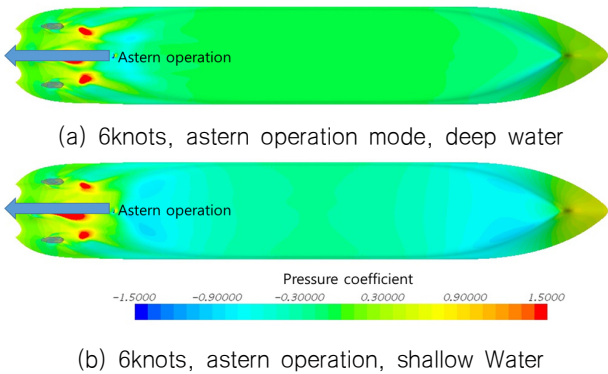


Fig. 19 Pressure distribution for astern operation mode in deep and shallow waters

7. 결론

다중 포드 추진시스템을 적용한 쇄빙선박에 대한 여유추력 추정을 위하여 체적력 모델을 적용한 수치해석기법을 검토하였다. 쇄빙천연가스운반선을 대상으로 한 수치해석을 통해 추정된 여유추력과 모형시험 결과와의 비교, 검토로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 주요 운항속도인 3~6노트에서, 전진시 여유추력 추정 결과는 모형시험 결과와 잘 일치함을 확인하였고, 후진운항의 결과는 모형시험 결과 대비 약 6% 정도 크게 추정함을 확인하였다.
- 2) 심수 및 천수에 대한 여유추력 추정 결과로부터, 수심 차이를 제외한 모든 것이 동일한 운항조건에서, 천수에서의 여유추력이 심수에 비해 약 6~12% 정도 감소함을 예측할 수 있다.
- 3) 상기 결과들을 토대로, 선박의 초기 설계 단계에서 주기 관 용량 검토 및 추진시스템 종류에 따른 여유추력 추정에 체적력 모델 적용이 가능함을 확인하였다.

References

- Jeong, S.Y. et al., 2017. Implementation of ship performance test in brash ice channel. *Ocean Engineering*, 140, pp.57-65.
- Jeong, S.Y. et al., 2018. A study of ship resistance characteristics for ice-strengthened vessel by broken ice channel width and size of broken ice pieces. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(1), pp.22-27.

Kashteljan, V.I., Poznyak, I.I., & Rylin, A.Ia., 1969. Ice resistance to motion of a ship. *Marine Computer Application Corporation*, Leningrad.

Rules for the classification and construction of sea-going ships, Russian Maritime Register of Shipping, 2016 Edition. Part II Hull, pp.134-138.

Rules for the classification and construction of sea-going ships, Russian Maritime Register of Shipping, 2016 Edition. Part VII Machinery Installations, pp.10-12.

Rules for the classification and construction of sea-going ships, Russian Maritime Register of Shipping, 2019 Edition. Part I Classification, pp.14.

Sydney Goldstein., 1929. On the vortex theory of screw propellers. *Royal society*, 123, pp.440-465.

