



# 수치해석을 이용한 쇄빙선박의 여유 추력 예측 연구

김용준<sup>1</sup>·김하늘<sup>2</sup>·송지수<sup>2,†</sup>·박형길<sup>3</sup>·김진규<sup>3</sup>  
한화오션(주)<sup>1</sup>  
국립한국해양대학교 조선해양시스템공학과<sup>2</sup>  
삼성중공업(주)<sup>3</sup>

## The CFD Study for the Prediction of Available Net Thrust on an Arctic Vessel

Yongjun Kim<sup>1</sup>·Haneul Kim<sup>2</sup>·Gisu Song<sup>2,†</sup>·Hyounggil Park<sup>3</sup>·Jinkyu Kim<sup>3</sup>  
Hanwha Ocean Co., Ltd.<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University<sup>2</sup>  
Samsung Heavy Industries Co., Ltd.<sup>3</sup>

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.

As Arctic sea ice continues to recede due to global warming, interest in the Northern Sea Route (NSR) is increasing. While vessel speed and power in open water can be reliably estimated using established methods, predicting the performance of an ice breaking vessel in ice covered waters remains a challenge. This paper investigates the prediction of net thrust for an ice breaking vessel using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Predicting the attainable speed in ice conditions is critical for design and operational safety. This study examines various factors affecting net thrust, focusing on a POD propulsion system and appendages such as skegs. Specifically, the impact of geometric design modifications including the pitch ratio and expanded area ratio of the propeller are analyzed. Furthermore, the influence of skeg configuration, such as position and quantity, is evaluated. Finally, the study addresses numerical methodologies, particularly the treatment of propeller rotation in simulations, to enhance the accuracy of performance predictions.

**Keywords** : Net thrust(여유 추력), Ice Breaking Vessel(쇄빙선), POD propulsor(포드 추진기), CFD(전산유체역학)

## 1. 서론

최근 지구온난화 및 지정학적 이슈로 인해 북극항로 개척 및 북극해 주변의 자원 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 북극해를 운항하는 선박은 여러 가지 환경적인 차이로 인해 일반적인 해역에서 운항하는 선박과는 선형적인 측면, 기능적인 측면에서 큰 차이를 가진다. 특히, 주어진 빙해 조건에서 빙 저항을 정밀하게 추정하는 것과 이를 극복할 수 있는 충분한 여유 추력을 확보하는 것은 쇄빙선의 설계단계에서 필수적으로 요구되는 사항이다. 빙 저항은 얼음의 두께, 강도, 밀도, 그리고 선박의 선수부 형상 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다(Myland and Ehlers, 2016). Fig. 1에 나타난 바와 같이, 빙 저항 곡선(blue)과 여유 추력(net thrust) 곡선(red)이 각각 주어지면 교차점이 만들어지는데 이 점이 주어진 빙해역 조건에서 해당 선박

이 도달할 수 있는 최대 속도를 의미한다. 일반적으로 빙 저항-속도 곡선은 빙해 수조에서 모형시험을 통해 얻을 수 있다. 반면, 여유 추력 곡선은 예인 수조에서의 모형시험 혹은 수치해석을 통해 산출하는데 여유 추력이란 해당 선박이 자체적으로 도달 가능한 최대 추진 성능을 표현하는 지표이므로 얼음과 프로펠러 간 상호작용 등은 고려할 필요가 없다.

예인 수조에서 수행되는 모형시험을 통해 신뢰도 높은 여유 추력 데이터를 산출할 수 있으나, 다양한 선속 및 추진기 회전속도 조건 하에서 반복적으로 수행되어야 하는 모형시험은 상당한 비용과 시간이 소모된다. 따라서 수치해석 기법을 활용하여 여유 추력을 효율적으로 예측하고 여유 추력에 영향을 주는 다양한 외부적 요인에 대하여 검토하는 것은 매우 필요한 업무이다. 수치해석적인 방법에 기초한 접근법은 아직까지 충분히 일반화되지 못하였고 제한적인 연구결과가 알려져 있다. Bekhit (2018)는 체

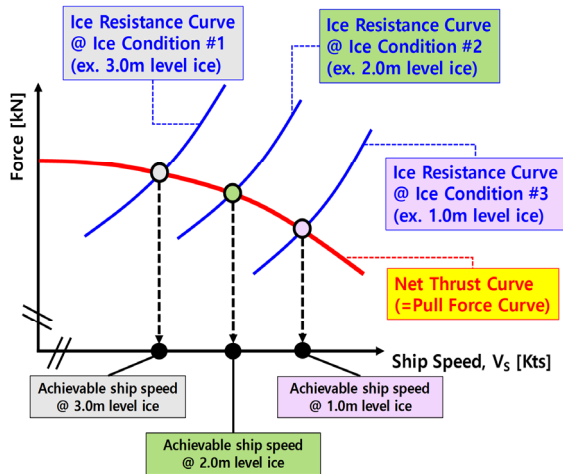


Fig. 1 Schematics of ice resistance curves (Blue) and net thrust curve (Red)

적력 모델 방법(Body Force Method)이 실제 프로펠러 회전을 모사한 방식과 유사한 수준의 결과를 제공함을 보고한 바 있고, Lee et al. (2021), Lee et al. (2022)은 계산 효율성을 고려하여 이 방법을 규칙파 및 불규칙파 조건의 자항 시뮬레이션에 적용하였다. Kim et al. (2021)은 3개의 포드 추진 시스템이 탑재된 쇄빙선을 대상으로 체적력 모델 방법을 적용하여 여유 추력을 예측하였고 모형시험 결과와 비교하였다. 또한 수심에 따른 영향도 함께 검토하였는데 천수역에서는 심해역 대비 6~12% 정도 여유 추력이 감소함을 언급하였다. Seo et al. (2024)은 1쌍의 포드(POD)추진기를 장착한 예인선을 대상으로 체적력 모델 방법을 이용하여, 다양한 운항 조건에서 선박과 추진기 간 유체역학적 상호작용을 분석한 바가 있다.

본 논문에서는 수치해석적인 방법을 기반으로 쇄빙선의 여유 추력을 예측함에 있어서, 포드 추진기의 프로펠러 형상, 스키펬과 포드 추진기 간의 거리 혹은 위치, 프로펠러 회전 모사 방법 등의 변화가 어떤 영향을 미치는지 분석하고자 하였다.

## 2. 수치해석 기법

### 2.1 수치해석 기법 정의

본 연구에서는 유체 해석용 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+를 이용하여 수치해석을 수행하였고 연구에 적용된 주요 수치 기법은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 대상선 정의

Table 2에는 본 연구에서 사용된 대상 선박의 주요 제원을 나타내었다. 본 선박은 빙해지역에서 운항이 가능한 액화천연가스 운반선이며, 주 추진 시스템으로 3기의 포드 추진기가 탑재되어 있다. 또한 일반 해역 운항 시 선박의 직진성능을 향상시킬 목적

Table 1 Numerical set-up

Items	Methods
Code	STAR-CCM+ Ver. 15.06
Governing Equation	RANS
Turbulence model	Reynolds stress model
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Propeller Rotation	Body Force Method & Sliding mesh

Table 2 Main particulars of the target vessel

Items	Unit	Description
LOA	m	Approx. 300.0
Beam	m	48.8
Td	m	11.7
Propulsion Type	-	Triple (3) PODs
Propulsion Power	-	15MW x 3EA
Propeller Diameter	m	6.0
Scale Ratio	-	33.333
Propeller Rotation	-	(In looking upstream) Center & PORT Side POD : Clockwise Rotation STBD Side POD : Counterclockwise Rotation
Appendages	-	Twin skeg in front of Wing POD (PORT & STBD)

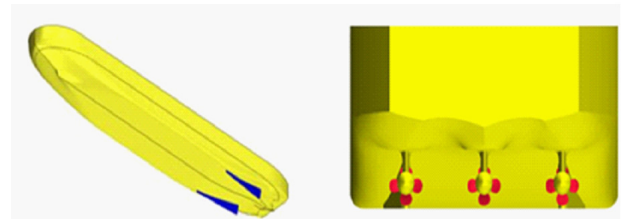


Fig. 2 Geometry of target vessel

으로 좌, 우현의 포드 추진기 전방에 스키펬이 각각 하나씩 배치되어 있다. 대상 선박은 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.3 계산영역 및 경계조건 정의

계산 영역은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 선박 길이(L)를 기준으로 무차원화하여, 가로 4.0L, 세로 3.0L, 수직 방향 1.0L로 각각 설정하였다. 본 연구에서 자유수면을 고려하지 않았으며, 선박의 흡수 이하 영역만을 계산 영역으로 정의하였고 계산 영역의 상단 및 하단 경계에는 Fig. 3과 같이 대칭 경계조건이 적용되었다.

### 2.4 격자 시스템 정의

본 연구에서 사용된 격자 시스템은 비정렬 격자계로 Fig. 4에 제시하였다. 격자수의 효율적 경감을 위해 벽함수(Wall Function)

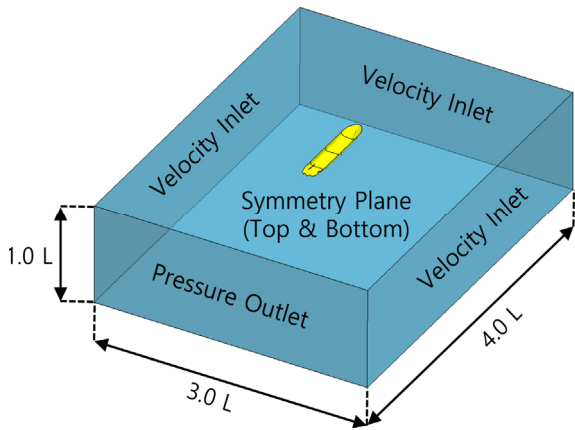


Fig. 3 Computational domain and boundary condition

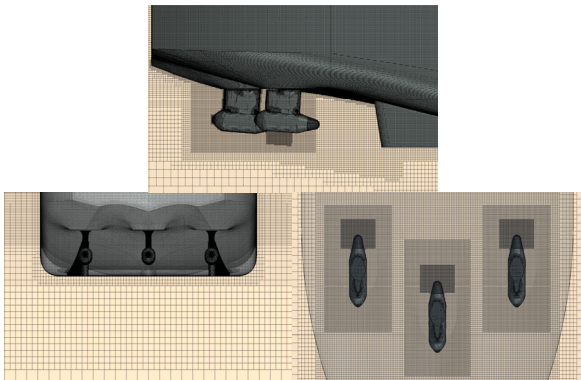


Fig. 4 Grid system of target vessel

가 적용되었으며, 벽으로부터 첫 번째 무차원 격자크기를 의미하는  $y_1^+$ 는 50으로 설정하였다. 3기의 포드 시스템을 포함한 전체 격자수는 약 750만 개이며 계산 비용 및 시간을 절감하기 위해 포드의 프로펠러는 실제 형상으로 모델링하지 않고, Kim et al. (2021)와 Seo et al. (2024) 등 기존 연구에서 적용되었던 체적력 모델 방법을 활용하여 모사하였다.

### 2.5 유입속도면의 위치 정의

체적력 모델 방법을 적용하여 프로펠러의 회전효과를 모사하기 위해서는, 적절한 유입속도면(Inflow Velocity Plane)의 위치 선정이 가장 중요하다. 유입속도면은 프로펠러가 산출하는 추력과 토크를 산정하기 위해 필요한 유속 데이터를 수집하는 기준면을 의미한다. 즉, 유입속도면에서 수집된 유속으로부터 프로펠러의 전진비(J) 조건이 정의되고 이미 확보되어 있는 해당 프로펠러의 단독 성능(POW) 곡선이 있다면 해당 전진비에서 추력계수와 토크계수를 찾을 수 있다. 다시 말해 정의되는 유입속도면의 위치에 따라 추력 및 토크 값이 달라질 수 있으므로, 결과적으로는 수치해석의 결과가 영향을 받을 수 있음을 의미한다. Seo et al. (2024)도 다양한 선종과 추진시스템을 대상으로 유입속도면의 위치를 일률적으로 표준화하는 것은 현실적으로 어렵다고 언급한 바 있으며 과부하(bollard pull) 조건을 포함하여 수치해석 결과의

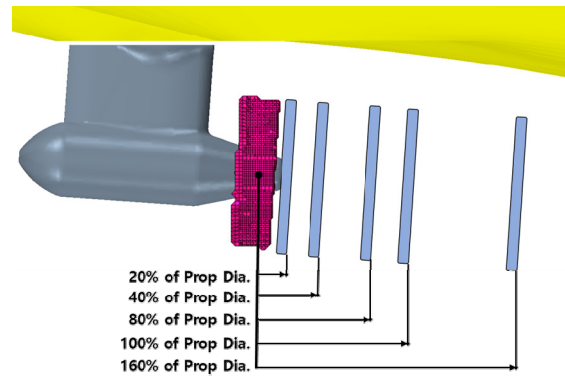


Fig. 5 The positions of the inflow plane

Table 3 The simulation cases with various inflow plane positions

Ship Speed (Knots)	RPS	Operation mode	Inflow Plane Distance
3, 6, 9	6, 10, 12	Ahead	20% of Prop Dia.
			40% of Prop Dia.
			80% of Prop Dia.
			100% of Prop Dia.
			160% of Prop Dia.

정도 향상을 위해 유도 유속(induced velocity)을 보정하는 기법을 제안하였으나 이 역시 모형시험 데이터가 사용되었다는 한계가 있다. 현실적으로 비교, 활용할 수 있는 모형시험 결과가 존재하는 경우에는 적절한 유입속도면의 위치를 정의하는 것이 용이하지만 향후 이 부분에 대한 보완 혹은 다른 접근 방법에 대한 연구는 반드시 필요하다고 사료된다. 본 연구에서는 제한적이지만 다양한 유입속도면 위치에 대해 수치해석을 수행한 후 모형시험 결과와 비교함으로써 최적의 위치를 도출하였다. 전진 운항 조건에서 정의한 다양한 유입속도면의 위치는 Fig. 5 및 Table 3에 나타내었다. 그리고 Kim et al. (2021) 등이 언급한 바 있는 프로펠러 단독성능 시험 결과와 이후 수행된 모형시험 결과 등은 삼성중공업으로 제공받았음을 밝힌다.

여유 추력이란 정의된 해당 선속으로 선박 이동 시 각각의 회전수로 선박의 추진시스템을 작동시키고 이 때 발생하는 총 추력에서 각종 부가물 등이 포함된 선체의 총 저항을 차감한 값을 의미하며, 이 과정에서 토크값도 동시에 계측한다. 이러한 방법으로 모형시험이나 수치해석을 수행하고 최종적으로는 실선 스케일로 확장하여 평가한다. 이 때 식 (1)에 기술한 바와 같이 프루드(Froude)수 상사를 통해 실선 스케일에서의 프로펠러 회전수, 추력, 토크 및 여유 추력 등을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_S &= \frac{N_M}{\sqrt{\lambda}} & T_S &= T_M \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^3 \\
 Q_S &= Q_M \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^4 & T_{Net,S} &= T_{Net,M} \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^3
 \end{aligned} \tag{1}$$

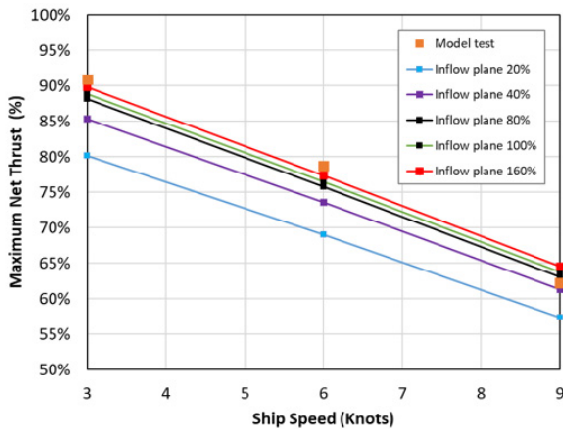


Fig. 6 Comparison of normalized net thrust with respect to ship speed

Table 4 The comparison of normalized net thrust ratio from numerical simulation and model test

Ship Speed (Knots)	x/Dia.	x/Dia.				
		0.2	0.4	0.8	1.0	1.6
3	0.2	88.19%	93.87%	96.89%	97.71%	98.72%
	0.4					
	0.8					
6	0.2	87.67%	93.43%	96.23%	97.16%	98.22%
	0.4					
	0.8					
9	0.2	92.10%	98.52%	101.3%	102.5%	103.7%
	0.4					
	0.8					

Fig. 6은 유입속도면의 위치 변화에 따른 정규화된 여유 추력 곡선의 변화를 나타내며, Table 4에 제시된 바와 같이, 대상 선박의 경우 유입속도면을 전방으로 멀리 배치할수록 모델 시험 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 스케그와 같은 부속 구조물의 영향으로, 유입속도면이 스케그에 가까워질수록 국지적으로 유속이 감소되고, 그 결과 체적력 모델방법으로 추정된 추진시스템의 추력이 증가하여 여유 추력도 과대평가되는 것으로 설명된다. 특히, 유입속도면이 스케그에 과도하게 근접할 경우, 스케그로 인해 교란된 유동이 실제 프로펠러 유입 조건과는 큰 괴리를 발생시킬 위험도 있으므로 본 연구에서는 추진기 전방으로 프로펠러 직경의 80%에 해당하는 위치를 유입속도면으로 설정하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 여유 추력 산정

Table 5에 제시된 바와 같이, 본 연구에서는 대상선박의 여유 추력을 알기 위해서는 다양한 선속 및 회전수가 정의되어야 한다. 본 연구에서는 모형시험이 수행된 조건과 동일하게 총 28조건(4개 선속 조건과 7개의 회전수 조건)에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 7은 선박의 각 속도 조건에서 수치해석과 모델 시험을 통해 얻은 무차원화된 여유 추력과 동력 간의 관계를 나타낸다. 이때 무차원화의 기준 동력과 추력은 해당 선박의 100% 동력의 값과 그 상태에서의 여유 추력이다.

Table 5 Numerical simulation conditions

Ship Speed (Knots)	0.1	3	6	9
RPS	4, 6, 8, 10, 11, 12, 13			

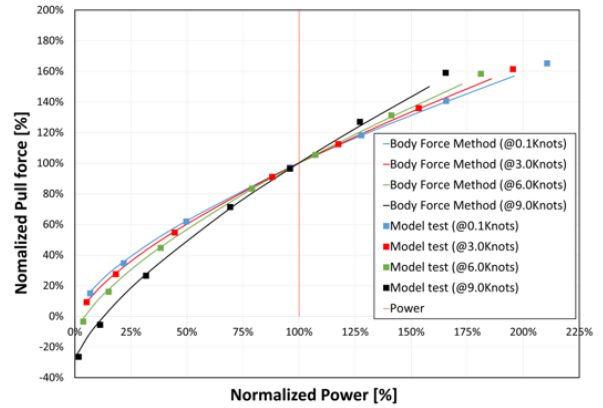


Fig. 7 The comparison of normalized net thrust from CFD simulation and model test in four different ship speed conditions

Table 6 Comparison of net thrust from CFD and model test in ahead condition

Ship Speed (Knots)	Maximum Net Thrust by CFD (Body Force Method)	Maximum Net Thrust by Model test	Diff. (%)
0.1	98.7%	100.0%	1.3%
3	87.6%	90.9%	3.3%
6	75.1%	78.7%	3.6%
9	62.2%	62.2%	0.0%

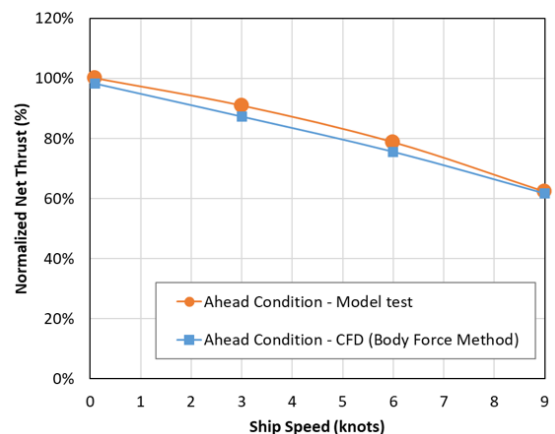


Fig. 8 The relation between normalized net thrust and ship speed in ahead condition

Table 6에는 전진 운항 조건(ahead condition)을 제시하였고, Fig. 8은 수치해석 및 모형시험 결과를 통해 산출된 각 선속별 최대 여유 추력을 정규화하여 비교한 것이다. 두 방법 모두에서 선속이 증가함에 따라 여유 추력은 감소하는 경향으로 일관되게 산

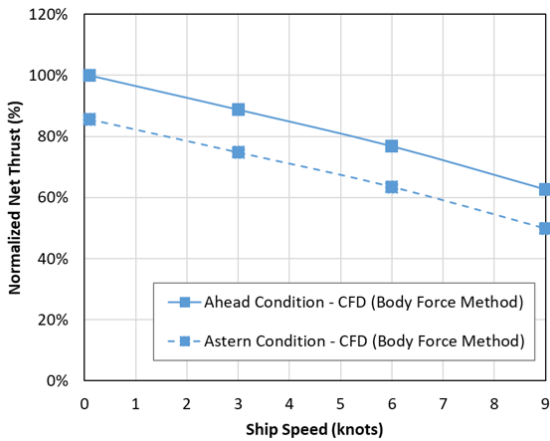


Fig. 9 The relation between net thrust and ship speed in ahead condition and astern condition from numerical simulation

Table 7 Comparison of net thrust at specific condition in both directions

Ship Speed (Knots)	Ahead Condition (전진 운항 조건)	Astern Condition (후진 운항 조건)	Astern Condition (후진 운항 조건) / Ahead Condition (전진 운항 조건)
0.1	100.0%	85.8%	85.8%
3	88.7%	75.4%	85.0%
6	76.0%	64.3%	84.6%
9	63.0%	51.0%	81.1%

출되었으며, 이전 연구의 결과와도 동일한 경향이다(Kim et al. 2021). 모형시험과 수치해석 결과 간의 정량적 차이는 약 4% 이내이므로, 체적력 모델 방법을 적용한 수치해석이 쇄빙선의 초기 설계단계에서는 실용적으로 활용될 수 있다고 판단된다.

후진 운항 조건(astern condition)에서도 동일한 과정을 거쳐 각 선속별 최대 여유 추력을 예측하였고 Fig. 9에 도시한 바와 같이 전진 운항 조건에서의 수치해석결과와 비교하였다. Table 7에 정량적으로 비교된 바와 같이, 전진 운항 조건에서 산출되는 여유 추력은 선속에 관계없이 일관되게 후진 운항 조건 대비 약 15~20% 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 운항 방향별 선체의 저항 차이, 포드 추진기류의 유입류 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.2 직접회전방법 모사

체적력 모델 방법을 통해 얻은 시뮬레이션 결과는 모델 테스트와 유사한 경향을 보였으나, 일정 수준의 오차도 확인할 수 있었다. 이 오차는 포드 추진기의 프로펠러가 직접 회전하는 것이 아니라 회전효과를 근사함으로써 발생한 한계이다. 따라서 본 절에서는 프로펠러 직접 회전방법(sliding mesh method)을 구현하고 결과의 개선 여부를 확인하고자 한다. 프로펠러 직접 회전방법의 적용을 위해 계산 영역을 회전 영역과 비회전 영역으로 구분

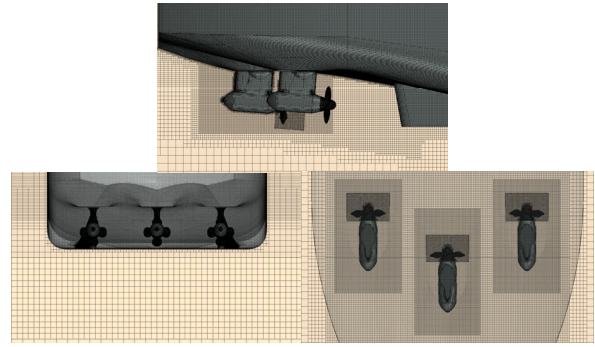


Fig. 10 Grid system of propeller for sliding mesh method simulation

Table 8 Numerical simulation conditions with sliding mesh method

Ship Speed (Knots)	3	6	9
RPS	6, 10, 12		

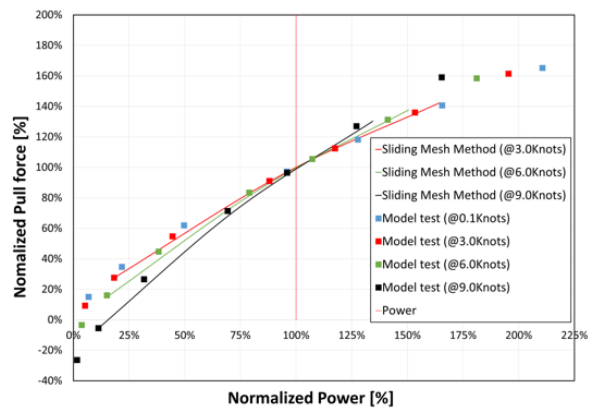


Fig. 11 The comparison of available net thrust from CFD and model test in three different ship speed cases

하고, 회전 영역 내부의 프로펠러를 보다 사실적으로 모사하고자 다면체(polyhedral) 격자계를 적용하였다. 이전 격자 시스템과 동일한 벽함수를 적용하고자  $y_1^+$  값이 약 50으로 유지되도록 하였고, 3기의 포드 추진기를 포함한 전체 격자 수는 약 1,200만 개로 체적력 모델 방법 대비 약 1.6배 정도 격자 개수가 증가되었다. 본 연구에서 사용된 세부 격자 구성은 Fig. 10에 나타내었다.

프로펠러 직접 회전방법은 높은 계산 비용을 요구하기 때문에, 본 연구에서는 모델 스케일에서 전진 운항 조건 중 Table 8에 제시된 바와 같이 Table 5 대비 일부 축소된 선속 및 회전수(rps) 범위에서 수치해석을 수행하였고, 이후 계산된 결과는 앞서 언급한 방법과 동일하게 프루드 상수를 적용하여 실선 스케일로 확장하였다.

Fig. 11은 프로펠러 직접 회전방법을 적용한 수치해석과 모형 시험으로부터 각각 도출된 선속별 여유 추력과 동력 사이의 관계를 정규화하여 도시한 것으로 서로 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

프로펠러 직접 회전방법과 체적력 모델 방법으로 각각 산출된

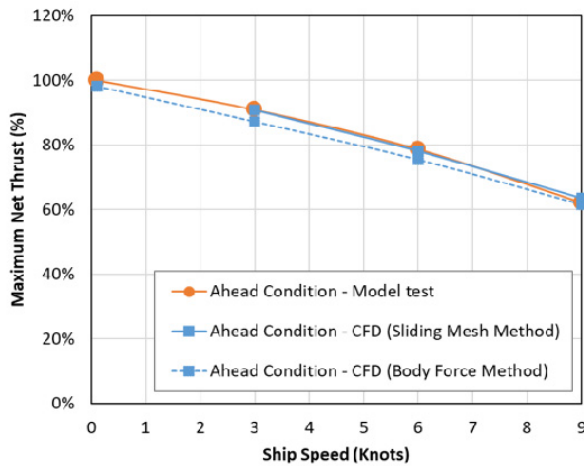


Fig. 12 The relation between normalized net thrust and ship speed with sliding mesh method in ahead condition

Table 9 Comparison of net thrust from CFD and model test in ahead condition with sliding mesh method

Ship Speed (Knots)	Maximum Net Thrust by CFD (Sliding Mesh Method)	Maximum Net Thrust by Model test	Diff. (%)
3	90.8%	90.9%	0.2%
6	78.1%	78.7%	0.6%
9	63.6%	62.2%	-1.4%

수치해석 결과와 모형시험 결과를 이용하여 여유 추력곡선을 산출하고 정규화하여 Fig. 12에 도시하였다. Table 9에도 제시된 바와 같이, 프로펠러 직접 회전방법을 적용한 수치해석과 모형시험 결과의 차이는 약 1% 내외로 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

### 3.3 스케그 위치에 따른 여유 추력의 변화

스케그의 면적이나 개수는 빙해역이 아닌 일반해역에서 운항하는 경우, 선박의 직진성과 직접적인 관련이 있고 또한 추진기로의 유입류는 캐비테이션 발생과 밀접한 연관이 있으므로 중요한 설계 요소 중 하나이다. 특히, 북극해와 같은 해역에서 운항하는 선박의 프로펠러는 구조적 강도를 확보하기 위해 일반적으로 스큐(Skew)를 거의 적용하지 않기 때문에 일반 해역에서는 캐비테이션 성능이 더욱 불리하다. 따라서 포드 추진시스템의 전방에 위치하는 스케그와의 거리나 개수는 캐비테이션 성능 측면에서도 검토할 필요가 있는데, 본 연구에서는 여유 추력에도 어떤 영향을 미치는지 고찰하고자 하였다. 대상선의 기존 스케그는 Fig. 13에 나타난 바와 같이, 좌우측 포드 추진기의 프로펠러 중심으로부터 전방에 배치되어 있다. 그리고 Fig. 14와 같이 중앙 포드 추진기 전방에 단일 스케그가 위치하는 경우도 함께 검토하고자 동일한 기준으로 전방 2D 지점에 스케그를 배치하였다. 이들을 각각 Case 1과 Case 2로 정의하였고, Table 10에 나타난 바와 같이 스케그와 포드 추진기의 프로펠러 간의 거리를 바꾸어

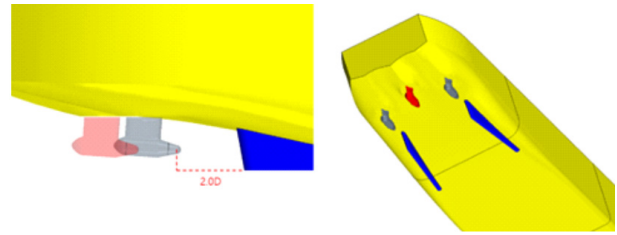


Fig. 13 Geometry of wing skegs (Case 1)

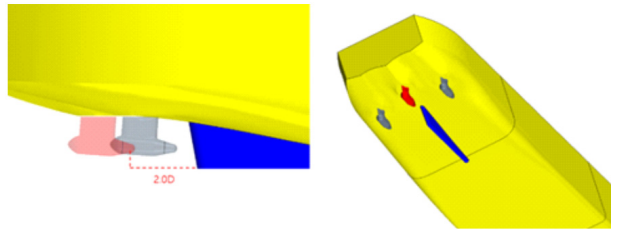


Fig. 14 Geometry of center skeg (Case 2)

Table 10 Simulation conditions for analyzing the effects of skeg

Ship Speed (Knots)	RPS	Operation mode	Skeg position	Remark
3, 6, 9	6, 10, 12	Ahead Condition	1.2D	Closer
			1.6D	
			2.0D	Base
			2.4D	Further
			2.8D	

Table 11 Comparison of net thrust results based on skeg position at wing skeg

Ship Speed (Knots)	Skeg position				
	1.2D	1.6D	2.0D	2.4D	2.8D
3	0.22%	0.06%	Base	-0.02%	-0.02%
6	0.47%	0.13%	Base	-0.07%	-0.08%
9	1.02%	0.25%	Base	0.15%	0.04%

가면서 각 조건에서의 여유 추력 변화를 분석하였다.

Case 1과 같이 좌우에 위치한 스케그의 위치 변화에 따른 유효 추력의 영향을 Table 11과 Fig. 15에 제시하였다. 스케그와 포드 추진기 간의 거리가 멀어질수록 유입 유속이 증가하고, 이는 전진비가 높아짐을 의미하므로 동일한 회전수에서 프로펠러의 추력과 토크는 감소하며, 스케그 저항 또한 함께 감소하였다. 반대로 두 요소 간의 거리가 가까워질수록 유입 유속은 감소하고, 프로펠러의 추력과 토크는 증가하나, 스케그 끝단 부근 선체의 압력 회복이 저하되어 전체 저항이 증가하는 경향을 보였다. 그럼에도 불구하고, Table 11에 나타난 바와 같이 여유 추력은 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

Case 2는 중앙 스케그의 위치 변화를 의미하며 수치해석 결과는 Fig. 16과 Table 12에 정리하였다. 중심 스케그 위치에 따른 선체 압력 분포와 반류 분포는 좌우 대칭의 형태를 보이며, Case

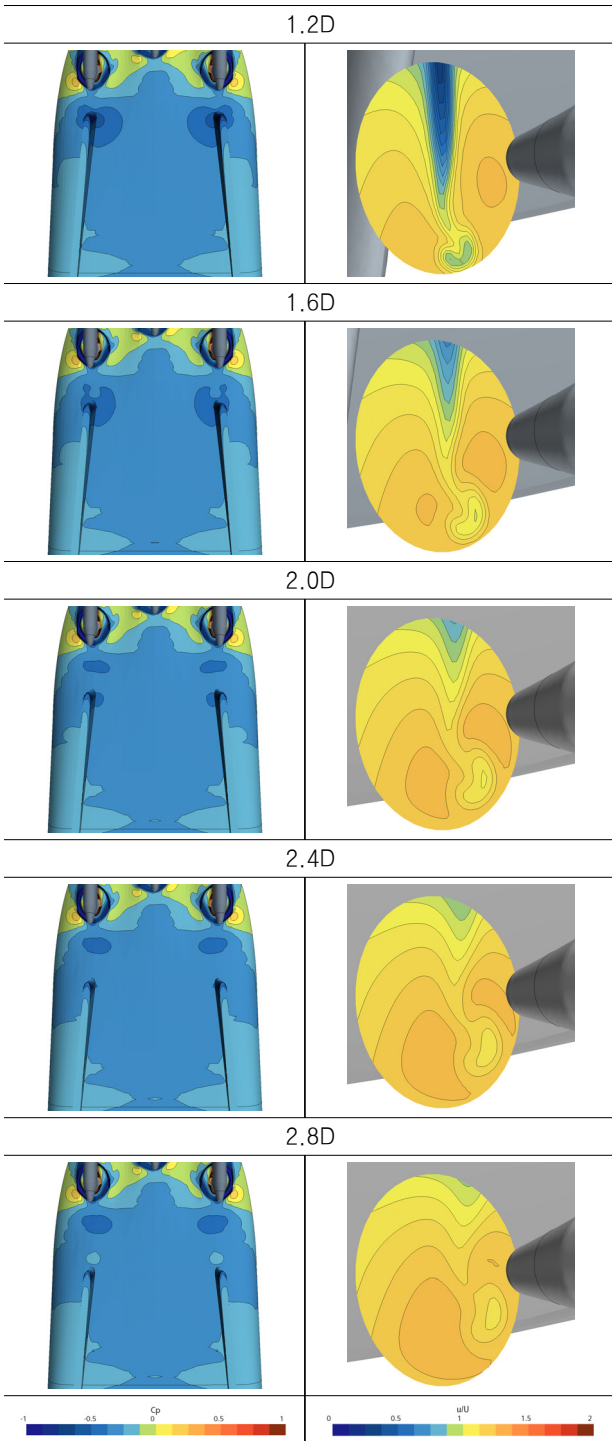


Fig. 15 Pressure field (Left) and velocity field (Right) according to the wing skeg position at 3Knot & 10rps

1과 마찬가지로 여유 추력의 변화는 거의 없음을 확인할 수 있다.

### 3.4 포드 추진기의 프로펠러 변화에 따른 영향도 고찰

본 절에서는 포드 추진기의 프로펠러 제원 변화가 여유 추력에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 프로펠러의 익수는

Table 12 Comparison of net thrust results based on skeg position at center skeg

Ship Speed (Knots)	Skeg position				
	1.2D	1.6D	2.0D	2.4D	2.8D
3	0.00%	0.00%	Base	0.02%	0.01%
6	0.36%	0.19%	Base	0.10%	0.05%
9	1.05%	0.66%	Base	0.60%	0.54%

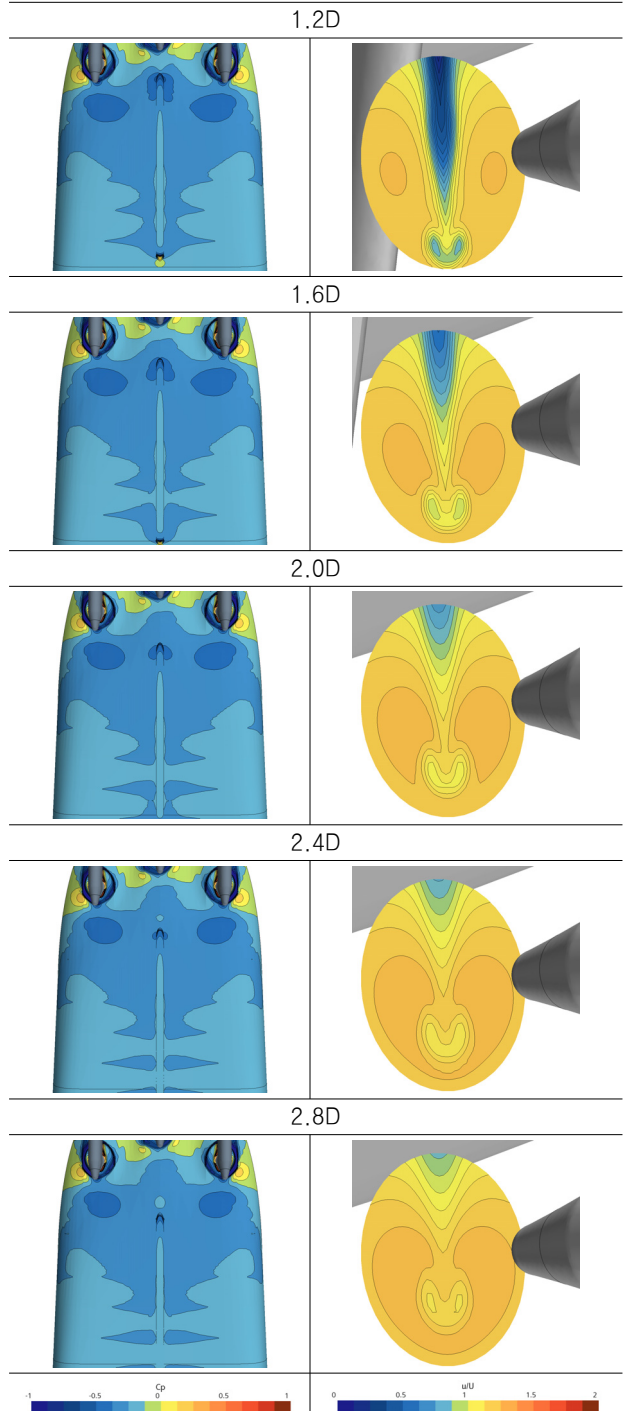


Fig. 16 Pressure field (Left) and velocity field (Right) according to the center skeg position at 3Knot & 10rps

Table 13 Computational conditions for propeller parameter variation

Ship Speed (Knots)	RPS	Propeller particulars		Remark
3, 6, 9	6, 10, 12	Case 1-1	$P/D_{Mean} = 0.750$ $A_e/A_o = 0.643$	Mean Pitch ↓
		Case 1-2	$P/D_{Mean} = 0.950$ $A_e/A_o = 0.643$	Mean Pitch ↑
		Base	$P/D_{Mean} = 0.848$ $A_e/A_o = 0.643$	-
		Case 2-1	$P/D_{Mean} = 0.848$ $A_e/A_o = 0.550$	EAR ↓
		Case 2-2	$P/D_{Mean} = 0.848$ $A_e/A_o = 0.750$	EAR ↑

4적으로 고정하고 프로펠러의 성능에 직접적인 영향이 큰 평균 피치비와 전개 면적비를 변수로 정의하였으며 그 외 나머지 프로펠러 설계변수들은 모두 동일하게 유지하였다. 수치해석은 체적력 모델 방법을 이용하여 수행되었고, 각 대상 프로펠러의 단독 성능 곡선을 반영하였다. Table 13에는 프로펠러의 제원 변화에 대해 상세히 정리하였다. 대상 프로펠러(Base)를 기준으로 평균 피치비를 감소시키거나 증가된 경우를 Case 1-1과 Case 1-2로 명명하였고, 전개면적비가 감소시키거나 증가된 경우를 Case 2-1과 Case 2-2로 명명하였다.

추진기의 제원 변화에 따른 여유 추력의 변화는 Fig. 17과 Table 14에 제시하였다. 평균피치비는 프로펠러 추진 성능에 큰 영향을 미치는 핵심 설계변수 중 하나로 평균피치비가 작은 Case 1-1의 경우 낮은 선속에서 기준 프로펠러(Base) 대비 더 높은 여유 추력을 산출하였으나, 선속이 높아지면 오히려 여유 추력은 감소하였다. 반면 평균피치비가 기준 프로펠러보다 큰 Case 1-2의 경우, Case 1-1과는 반대의 경향을 보였다. 전개면적비 또한 추진 성능에 큰 영향을 미치는 주요 설계 변수이다. Case 2-1의 경우, 동일한 평균피치비에서 전개면적비가 감소한 상황으로 프

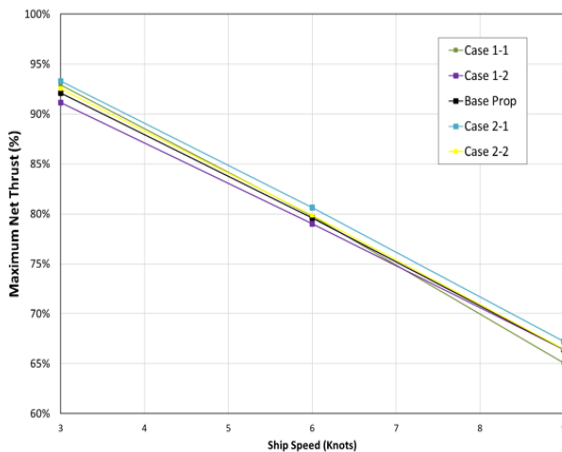


Fig. 17 Comparison of net thrust by ship speed for propeller parameter variations

Table 14 Comparison of net thrust by ship speed for propeller parameter variations

Ship Speed (Knots)	Case 1-1	Case 1-2	Base	Case 2-1	Case 2-2
3	0.89%	-1.06%	-	1.29%	0.46%
6	0.26%	-0.72%	-	1.30%	0.36%
9	-2.02%	0.02%	-	1.21%	0.07%

로펠러 표면적이 줄어들었으므로 토크가 감소하게 되고 이로 인해 모든 선속 범위에서 여유 추력이 향상되었다. 반면 Case 2-2에서는 증가된 전개면적비로 인해 추력과 토크가 모두 증가하지 않, 여유 추력의 변화가 크지 않았다. 특히, 고속 영역으로 갈수록 여유 추력 향상 증가폭은 감소하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 3개의 포드 추진기가 적용된 쇄빙선의 여유 추력을 추정함에 있어서 수치해석 기법의 활용 가능성을 검토하였다. 시간과 비용이 저렴한 수치해석을 기법인 체적력 모델을 통해 여유 추력에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자들에 대하여 비교하였다. 또한 프로펠러 직접 회전방법 기반의 시뮬레이션 결과도 추가하였으며 본 연구를 기반으로 다음과 같이 결론을 도출하였다.

(1) 체적력 모델 방법을 사용할 경우, 유입속도면의 위치 설정은 프로펠러의 추력 및 토크 계산에 직접적인 영향을 미치므로 매우 중요하다. 본 연구의 대상 선박에 대해 분석한 결과, 유입속도면은 프로펠러 중심으로부터 전방으로 프로펠러 직경의 80% 지점에 설정하는 것이 적절하였으며, 이 경우 여유 추력은 모델 시험 결과와 대략 3.0%대의 오차를 보였다. 반면 프로펠러 직접 회전방법을 적용하면 모형시험 대비 최대 1.5% 이내의 오차를 보였고, 체적력 모델 방법 대비 향상된 결과가 예측되었다. 하지만 체적력 모델 방법은 프로펠러 회전을 직접 모델링하는 방식에 비해 계산 비용과 시간을 크게 줄일 수 있으므로 쇄빙선의 초기 설계 단계에서 다양한 형태의 추진시스템 구성, 선형과의 조합 등을 검토할 때에는 활용도가 높을 것으로 생각된다. 다만, 최종적으로 결정된 대상선박의 여유 추력을 보다 정확하게 예측해야 할 때는 프로펠러 직접 회전방법의 적용도 필요하다고 판단된다.

(2) 스케그는 포드 추진기의 전방에 위치하며, 거리 변화에 따라 프로펠러 유입류 특성이 달라질 수 있다. 그러나 본 연구 결과, 포드 추진기의 전방에 배치된 스케그가 포드 추진기와 가까워지거나 멀어지는 경우 모두 여유 추력에는 큰 영향이 없을 것 을 알 수 있었다.

(3) 포드 추진기에 부착되는 프로펠러의 평균피치비가 낮아질수록 토크가 감소하여 저속 영역에서는 여유 추력이 향상되지만, 고속 영역에서는 여유 추력이 감소하였다. 반대로 피치비가 증가되면 피치비가 감소한 경우와는 반대 경향을 보였다. 동일한 평균 피치비를 가지는 경우 전개면적비가 감소하면 토크가 감소하

고, 이로 인해 모든 속도 범위에서 추진 효율이 향상되었다. 반면, 전개면적비가 커지면 여유 추력의 증가는 0.5% 이하임을 확인하였다.

추가적으로 향후 체적력 모델 방법의 적용 시 적절한 유입속도 면의 위치를 정의하기 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

## References

- Myland, D. and Ehles, S., 2016. Influence of bow design on ice breaking resistance, *Ocean Engineering*, 119, pp.217–232.
- Bekhit, A.S., 2018. Numerical simulation of the ship self-propulsion prediction using body force method and fully discretized propeller model. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 400, 042004.
- Lee, S.H., Paik, K.J., Hwang, H.S., Eom, M.J., and Kim, S.H., 2021. A study on ship performance in waves using a RANS solver, part 1: Comparison of power prediction methods in regular waves, *Ocean Engineering*, 227, 108900.
- Lee, S.H., Paik, K.J., Cho, J.H., Kim, G.H., Kim, H.S., and Kim, S.H., 2022. A numerical study on self-propulsion performance in waves and power prediction in irregular waves, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100454.
- Kim, J.K., Kim, H.T. and Lee, H.D., 2021. 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, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(3), pp. 158–166.

Seo, D.C., Jahra, F. and Wang, J., 2024. CFD simulation of hydrodynamic interaction between a ship and a PODDED propeller using body force method, *43rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering Conference, OMAE2024*, Singapore, Singapore, June.

## Authorship Contribution Statement

**Yongjun Kim:** Writing-original draft, Data curation, Software; **Haneul Kim:** Writing-original draft, Data curation Software; **Gisu Song:** Supervision, Writing-review & editing; **Hyounggil Park:** Conceptualization, Investigation; **Jinkyu Kim:** Conceptualization, Methodology.



김용준



김하늘



송지수



박형길



김진규