

Designation of the Boundary Conditions for Estimating the Thrust Loss due to Thruster-Hull Interactions

Gi Su Song¹, Seung Jae Lee² and Ju Sung Kim³

¹Assistant Professor, Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

²Professor, Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

³Principal Research Engineer, Samsung Ship Model Basin, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Daejeon, Korea

추진기-선체 상호간섭으로 인한 추력 손실 추정 시 적절한 경계조건 부과에 관한 연구

송지수¹, 이승재², 김주성³

¹한국해양대학교 조선·해양개발공학부 조교수

²한국해양대학교 조선·해양개발공학부 교수

³삼성중공업 대덕선박해양연구센터 프로

KEY WORDS: Thruster-Hull Interaction 추진기-선체 상호간섭, Thrust loss 추력 손실, Azimuth Thruster 전방위 특수추진기, Current load 조류저항, CFD 전산수치해석

ABSTRACT: The azimuth thruster is mainly installed on a vessel that requires a dynamic positioning (DP) function for special purposes. When the azimuth thruster on a vessel operates for DP, the thrust loss is induced by the thruster-hull interaction. This study examined the influence of boundary conditions in numerical simulations for predicting thrust loss. Wind turbine installation vessels (WTIV) and floating production storage and offloading (FPSO) were chosen as a target vessels. In this study, two types of boundaries were defined. The first consideration is that the boundary condition was assigned with consideration of the azimuth angle of the thruster, whereas it is fixed regardless azimuth angle of the thruster. The predicted thrust loss according to these boundary conditions showed a difference. This observation originated from the current load of the vessel. Therefore, the boundary conditions for which the current load is not induced need to be designated to obtain a realistic thrust loss in a numerical simulation.

1. 서 론

부유식 원유생산 저장 하역 설비(Floating production storage and off-loading, FPSO), 풍력발전기 설치선(Wind turbine installation vessel, 이하 WTIV), 반잠수식 해양구조물(Semi-submersible), 그리고 드릴쉽(Drill-ship) 과 같이 다양한 부유식 해양 설비 혹은 특수 목적의 선박 설계에 있어서 Dynamic positioning (DP) 성능은 매우 중요한 성능지표 중 하나일 뿐만 아니라 해당 설비의 운용성과도 직결된다. 다양한 해양 환경(바람, 파랑, 조류)에 대응하면서 동시에 해양 설비나 특수선의 안정적인 운용을 위해서는 추진시스템에서 산출하는 추력을 최대한 효과적으로 활용하는 것이 필수적이다. 이를 위해 일반적으로 해양설비나 특수선에는 복수 개의 전방위 특수 추진기(이하, Azimuth thruster)가 설치된다. 최적의 DP 성능을 발휘하기 위해, 설치된 Azimuth thruster는 최소한의 동력을 소비하면서 동시에 효과적으로 추력을 산출하여야 한다. 이를 위해 최적화 알고리즘에 따라 Azimuth thruster의 작동 방위, 필요 추력, 및 소모 동력 등이 제어된다. 하지만 일반적으로 Azimuth thruster가 해양설비나 특수선에 부착되면, 단독으로 존재하는 경우에 비하여 추력의 손실이 발생하는 것으로 알려져 있으며 Dang and Laheij (2004)은 이 현상이 4가지 간섭효과로부터 기인된다고 언급하였다. 이는 추진기-선체 간섭효과,

Received 29 November 2022, revised 29 November 2022, accepted 12 December 2022

Corresponding author Seung Jae Lee: +82-51-410-4309, slee@kmou.ac.kr

© 2022, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

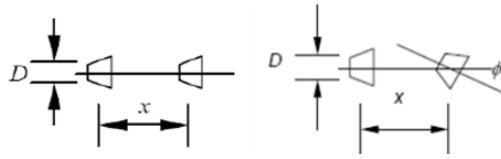


Fig. 1 Example of thruster-thruster interaction

추진기-추진기 간섭효과, 추진기-조류 간섭효과, 추진기-파랑 간섭효과를 의미하며, 추력 감소에 대한 정확한 예측은 해양 설비 및 특수선의 설계 단계에서 적절한 용량의 Azimuth thruster를 선정할 때 필수적으로 고려해야 하는 사항이다. 이들 간섭효과에 의한 추력 감소는 과거부터 모형시험과 수치해석적인 방법으로 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 Lehn (1980)은 추진기-추진기 간섭효과에 의한 추력 감소에 대해 실험적으로 연구를 수행하였다. Fig. 1과 같이 Azimuth thruster가 일렬로 2개가 놓여있을 때, 두 추진기 간의 거리(x) 혹은 전방에 위치한 Azimuth thruster의 작동 방향(ϕ)에 따라 후방에 위치한 Azimuth thruster의 추력성능이 얼마나 저하되는지 연구하였고, 간단한 추정식도 제안하였다. Nienhuis (1992)는 선체 하부에 위치한 Azimuth thruster의 후류가 선박 측면 쪽으로 흐를 때 선측 곡률에 따라 후류의 특성이 어떻게 달라지는지 실험적으로 연구하였다. Cozijn et al. (2010)은 PIV 시험장비를 이용하여, Nienhuis (1992)와 유사한 연구를 수행하였고, 후류를 정밀하게 측정, 분석하였다. 한편, 2000년대 이후 수치해석적인 방법을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. Song et al. (2013)은 WTIV를 대상으로 하여 추진기-선체 간섭효과, 추진기-추진기 간섭효과를 수치해석방법으로 모사하고, 추력 손실을 모형시험 결과와 정량적으로 비교하는 연구를 수행하였다. Ottens et al. (2011)은 Semi-Submergible를 대상으로 추진기-선체 상호간섭효과로 인한 추력 손실을 수치적으로 예측한 바가 있다. 또한 일반적으로 추진기-선체 상호간섭효과로 인한 추력 손실을 최소화할 목적으로 Azimuth thruster의 덕트나 프로펠러 회전축을 하방으로 $5^\circ \sim 7^\circ$ 가량 회전(Tilt)시키는데, Palm et al. (2010)은 이로 인한 추력 성능 및 상호간섭효과의 변화에 관해 연구하였다. 이전 연구자들의 연구를 종합하면 Dang and Lahcjj (2004)가 언급한 바와 같이 선종, 선형, 선미 부가물, 특수추진기의 형상 등 여러 가지 변수가 있지만, 추진기-선체 간섭효과에 의한 추력의 손실은 단독상태의 Azimuth thruster가 산출하는 추력의 대략 40%까지 발생할 수 있다. 또한 실제 DP는 통상적으로 해양설비 혹은 특수선박이 정지한 상태에서 추진기만 작동하는 상황인 블라드(Bollard) 조건에서 진행되는데, 이 조건을 수치해석 시 구현하기 위해서는 유의해야 할 점이 있음에도 불구하고 경계조건 부과에 대한 연구는 부족하다(Song et al., 2022).

본 연구에서는 추진기와 선체간의 간섭효과에 의해 필연적으로 발생하는 추력 손실을 예측함에 있어서, 수치해석 시 경계조건을 부과하는 방법에 따라 어떤 차이가 발생하는지 비교해보고, 향후 이와 유사한 해석을 수행할 때 실용적으로 적용 가능한 경계조건은 무엇인지 제안하고자 한다. 2장에서는 수치해석기법을 상세하게 다루고, 3장에서는 경계조건 부과방식에 따라 산출된 추력 손실의 차이를 비교하였다. 4장에서는 추력 손실의 차이가 발생하는 원인을 고찰하였고, 5장에서는 이 연구를 통해 도출된 결론을 제시하였다. 그리고 본 연구에서 사용된 대상선박의 형상, Azimuth thruster의 형상 및 관련 모형시험 결과는 모두 삼성중공업 대덕선박해양연구센터(Samsung Ship Model Basin)에서 제공되었다.

2. 수치해석기법

2.1 수치해석기법의 정의

본 연구는 수치해석적인 방법으로 진행되었고, 연구에 사용된 코드는 유체해석 상용소프트웨어 중 하나인 STAR-CCM+이다. 본 연구에서 적용된 기본적인 수치해석기법은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Numerical setup

| Item | Description |
|----------------------------|--|
| Code | STAR-CCM+ V.13 |
| Turbulence model | Realizable k- ϵ model |
| Convection term | 2nd order upwind |
| Grid type | Unstructured grid (Trimmer) |
| Pressure-Velocity coupling | Semi-implicit method for pressure linked equations |

2.2 해석 대상 정의

본 연구에서는 WTIV와 FPSO가 대상선으로 고려되었으며 이들의 제원은 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이 두 선박 규모의 목적이 다르므로 제원상 큰 차이를 보인다. 특히 폭/흘수의 비(B/T)가 큰 차이를 보이는데, WTIV는 폭에 비해 상대적으로 흘수가 작기 때문에 B/T 가 11.8 이라는 값을 보이는 반면, FPSO는 4.84로 상대적으로 작은 값을 가진다. 즉, FPSO의 경우에는 WTIV에 비하여 상대적으로 흘수가 크다는 것을 의미한다. Fig. 2에는 대상선을 각각 도시하였다.

Table 2 Main particulars of target vessels (WTIV and FPSO)

| Vessel | WTIV (A) | FPSO (B) | Ratio (=A/B) |
|-----------------------|----------|----------|--------------|
| Length, L (m) | 126 | 294.6 | 0.4 |
| Breadth, B (m) | 52 | 62 | 1.8 |
| Design draft, T (m) | 4.4 | 12.8 | 0.3 |
| L / B | 2.42 | 4.75 | 0.5 |
| B / T | 11.8 | 4.84 | 2.4 |
| Scale ratio | 25.9 | 32.5 | - |

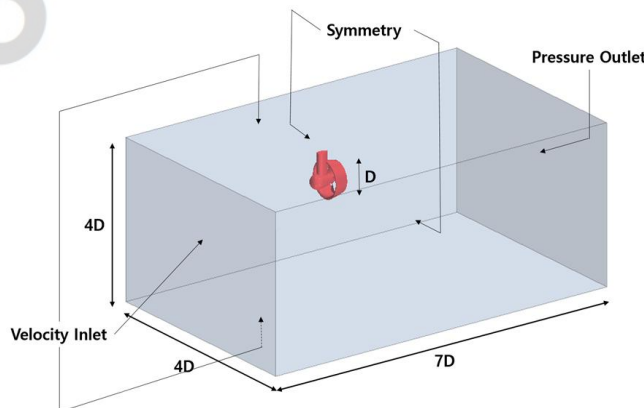

Fig. 2 Target vessel: (a) WTIV and (b) FPSO

2.3 Azimuth thruster의 단독상태 성능비교

상기 언급한 선박에는 모두 Azimuth thruster가 주 추진체계로 적용되고, 실제 대상선에서 발생하는 추진기-선체 상호간섭에 의한 추력 손실을 평가하려면 단독상태에서 산출하는 추력을 먼저 확보하고 있어야 한다. 따라서 본 절에서는 수치해석을 통해 예측된 Azimuth thruster의 단독 성능에 대하여 논하고자 한다. 모형시험을 위해 제작된 모형 Azimuth thruster의 제원은 Table 3에 나타내었다. Azimuth thruster의 추력은 형태적 특성으로 인해 세 가지 구성요소의 총합으로 정의된다. 즉, 프로펠러가 산출하는 추력(K_{TP}), 덕트가 산출하는 추력(K_{TD}), 그리고 나머지 구성요소들(Housing, Leg, 및 Support) 등의 저항(R)을 모두 합한 값이 Azimuth thruster의 전체 추력(K_{TT})으로 정의된다. Azimuth thruster의 단독상태 수치해석결과로부터 산출된 전체추력 값이 모형시험의 계측치 대비 3% 이내의 차이를 보이도록 격자계를 구성하는 것을 수치해석의 목표로 설정하였다. 본 해석은 프로펠러를 직접 회전시키는 직접 회전법(Sliding Mesh)을 사용하여 해석을 수행하였으며, 벽함수를 사용하고자 벽면 근처에서는 무차원 격자계 크기인 Y_1^+ 를 50으로 구성하였다. 전체 격자는 약 1.5백만개이며, 수치해석을 위한 다른 조건들은 Table 1과 같다. 단독상태 해석을 수행하기 위하여, 계산영역은 Fig. 3과 같이 프로펠러 직경을 기준으로 $7D \times 4D \times 4D$ 로 정의되었고, 속도입력(Velocity Inlet)조건과 압력유출(Pressure outlet)조건, 대칭경계조건(Symmetry)이 각각 부

Table 3 Specifications of model azimuth thruster

| Item | Description |
|-------------------------------|-------------|
| Duct | 19A |
| Propeller | SP463 |
| Model propeller diameter (mm) | 140 |
| Revolution of propeller | 20 |


Fig. 3 Computational domain and boundary condition for the Propeller Open Water of an azimuth thruster

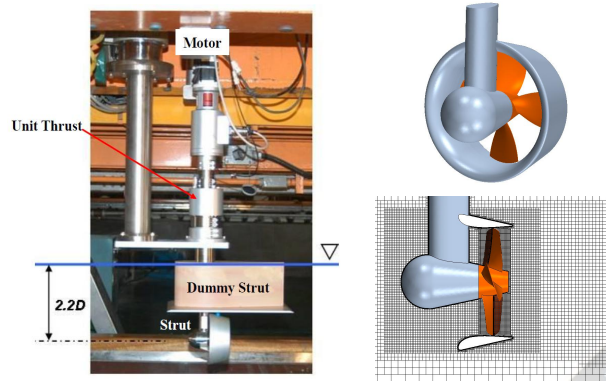


Fig. 4 Model test for the Propeller Open Water of an azimuth thruster and geometry, grid system

과되었다(Song et al., 2013). 또한 전진비(J)는 0.1부터 0.5까지 고려되었다. 예인 전차에 설치된 모형 Azimuth thruster와 수치해석을 위해 정의된 형상 및 Azimuth thruster 주변의 격자계 등은 Fig. 4에 도시하였다. 단독 시험결과와 수치해석의 결과는 다음과 같이 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다(Song et al., 2013).

Azimuth thruster의 전체 추력은 해석이 수행된 전진비 영역에서 목표로 했던 3% 이내의 결과를 보이고 있는 반면, 토크는 전반적으로 7~8% 정도의 차이를 일관되게 보였다. 본 연구의 목적은 Azimuth thruster의 추력과 관한 것이므로 예측된 추력계수를 토대로 Azimuth thruster 단독상태에 대한 수치해석은 신뢰성을 확보하였다고 판단하였다.

위의 결과로부터 전진비, J 가 0인 경우, 즉, Bollard 조건에서의 추력계수를 추정할 수 있고 실제 추진기-선체 간의 간섭효과로 인한 추력감소량을 예측할 때 기준 추력값으로 사용되었다.

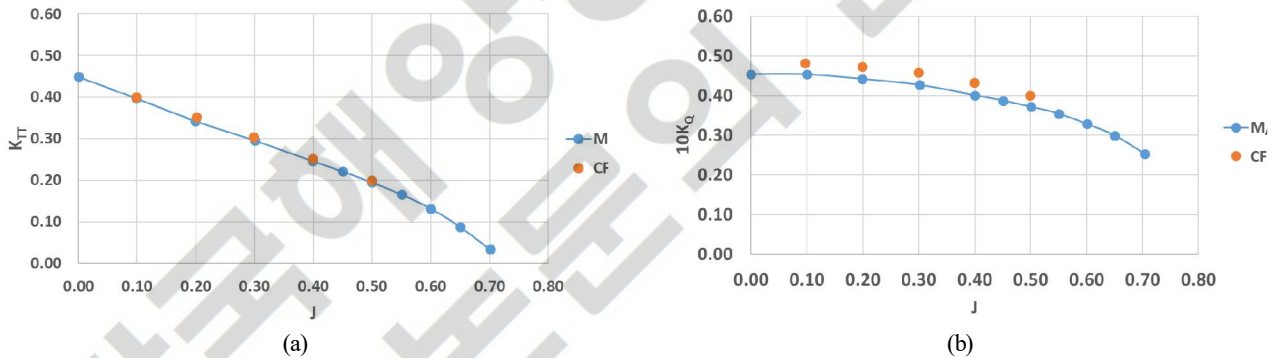


Fig. 5 Comparison of the Propeller Open Water on azimuth thruster from the model test and CFD simulation: (a) Total thrust coefficient (K_{TT}); (b) Torque coefficient ($10K_Q$)

Table 4 Comparison of K_{TT} and $10K_Q$ results from CFD and Mode test

| J (Advance ratio) | CFD (A) | | Model Test (B) | | Difference [1-(A)/(B)] | |
|------------------------|----------|---------|----------------|---------|------------------------|---------|
| | K_{TT} | $10K_Q$ | K_{TT} | $10K_Q$ | K_{TT} | $10K_Q$ |
| 0.1 | 0.399 | 0.482 | 0.397 | 0.453 | 0.65% | 6.34% |
| 0.2 | 0.352 | 0.473 | 0.342 | 0.441 | 2.88% | 7.15% |
| 0.3 | 0.304 | 0.458 | 0.295 | 0.427 | 2.90% | 7.40% |
| 0.4 | 0.252 | 0.432 | 0.246 | 0.400 | 2.38% | 7.89% |
| 0.5 | 0.200 | 0.400 | 0.195 | 0.371 | 2.56% | 7.70% |
| Average | - | - | - | - | 2.28% | 7.30% |

2.4 해석 조건 정의

추진기-선체 간의 간섭효과로 인한 추력감소를 수치해석적으로 연구하기 위하여 Fig. 6과 같이 계산영역을 정의하였다. 대상선의 길이(L)를 기준으로 계산영역의 크기를 정의하였고 X, Y, Z 방향으로 각각 $3.0L$, $3.0L$, $1.2L$ 의 크기를 가진다(Song et al., 2013; Song et al., 2022). 본 연구에서 자유수면은 고려되지 않았고, 선박의 흡수선 하부 영역을 해석영역으로 정의하였다. 또한 계산영역의 상부(Top)면과 하부(Bottom)면에는 대칭경계조건(Symmetry)이 적용되었다.

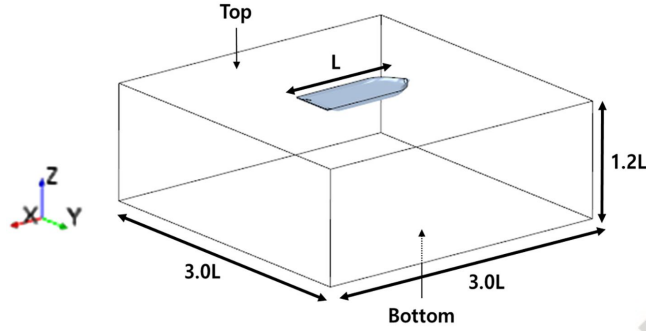


Fig. 6 Computational domain for target vessel

2.4.1 대상선 1: WTIV

WTIV의 경우, 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력감소는 모형시험을 통해 연구가 진행된 바 있으며, Fig. 7에는 모형시험을 위해 제작된 모형선을 도시하였다(Song et al., 2013). 본 선박에는 선미부의 좌현과 우현에 각각 1기씩 총 2기의 Azimuth thruster가 설치된다. 모형시험에서 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력감소는 선박이 정지한 상태에서 Azimuth thruster가 각 작동방향(작동방위) 별로 추력을 산출할 때, 선박의 종방향(X)과 횡방향(Y)으로의 걸리는 힘을 모두 계측함으로써 알 수 있다. 모형시험에서는 좌현 Azimuth thruster의 방위각을 15° 간격으로 1바퀴 회전시키면서 총 24조건에서 선체에 걸리는 종방향/횡방향의 힘을 계측하였다. 수치해석은 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력감소 효과를 명시적으로 알 수 있는 7개의 방위각 조건(0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225° 그리고 270°)에서 수행하였다. Table 5에는 기준좌표계 및 좌현 Azimuth thruster의 작동방위를 나타내었다. 또한 모형시험과 동일한 조건에서 해석을 수행하고자 양쪽에 Azimuth thruster를 모두 모델링한 상태에서 좌현 Azimuth thruster의 방위각을 바꿔가며 해석을 수행하였다.

수치해석을 위한 격자계는 앞서 언급한 Azimuth thruster의 단독상태 해석 시 적용된 방법과 동일하게 구성되었다. 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력감소는 궁극적으로는 Azimuth thruster의 후류가 코안다 효과(Coanda effect)에 의해 선체의 표면으로 부착되면서 선체의 마찰저항이 증가되거나, 선체의 일부와 부딪히면서 선체의 압력이 증가되어 발생한다. 따라서, Azimuth thruster의 후류 모사가 중요하므로, Fig 8과 같이 이

Table 5 Specifications of the coordinate system and simulation cases with respect to azimuthing angle on the port side



Fig. 7 Ship and azimuth thruster for model test

| Geometry | |
|-------------------|------|
| | |
| Coordinate system | 0° |
| | |
| 45° | 90° |
| | |
| 135° | 180° |
| | |
| 225° | 270° |

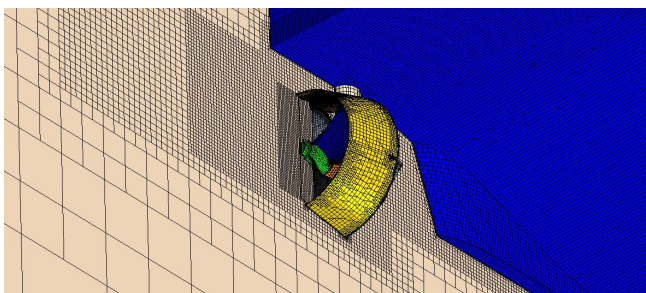


Fig. 8 Grid system for CFD on target vessel, WTIV

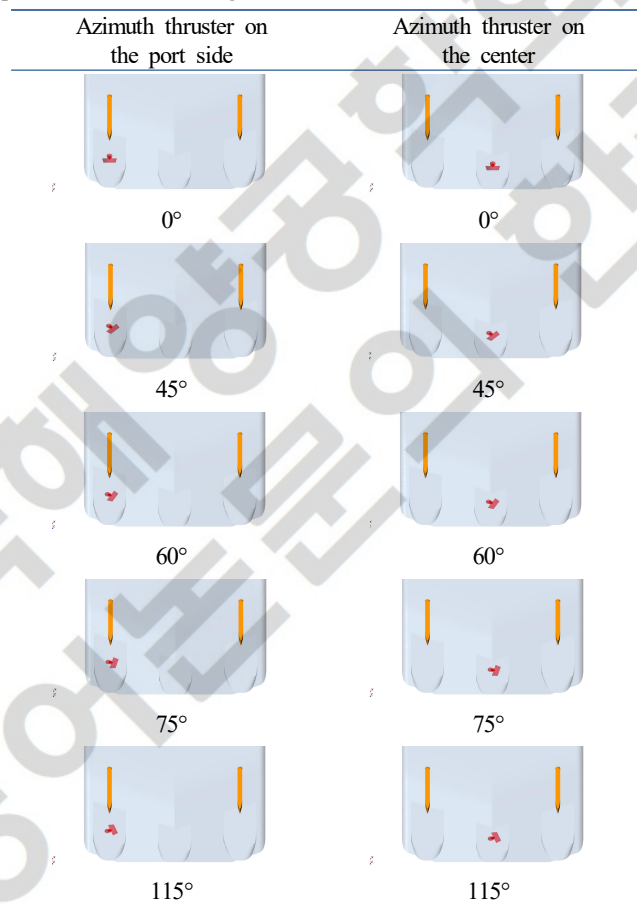
후류 공간에 격자계를 조밀하게 구성하였다. 또한, 프로펠러의 직접회전방법을 적용하면, 정확도 측면에서는 유리하지만 계산시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. Song et al. (2013)은 프로펠러 회전을 모사하는 방법에 따른 추력손실 결과를 비교한 바 있고, 그 연구를 근거로 본 연구에서는 Moving reference frame (MRF) 방법을 적용하였다. 2기의 Azimuth thruster와 수선면 하부의 선체를 대상으로 정의된 전체 격자계는 약 3.5백만개이다(Song et al., 2022).

2.4.2 대상선 2 : FPSO

FPSO의 경우, Fig. 2에 나타난 바와 같이 선미부에 3개의 거치부(이하, Head box)가 존재하고 각 Head box 면에 하나씩 Azimuth 가 위치한다. 본 대상선의 경우 별도의 모형시험은 수행되지 않았고 수치해석적인 방법으로 추진기-선체 간섭효과에 의한 추력 손실을 산출하였다. 이를 위해, Table 6에 나타난 바와 같이 좌현(Port Side) 혹은 중앙(Center)의 Head box 면에 Azimuth thruster가 각각 단독으로 설치된 상태에서 5개 방위각(0°, 45°, 60°, 75°, 115°)을 정의하였다.

FPSO에 장착되는 Azimuth thruster은 앞선 대상선인 WTIV에 설치되었던 것과 형상은 동일하나 용량도 다르고, 대상선 간의 스케일비도 다르다. FPSO에 장착되는 모형 Azimuth thruster의 직경은 120mm로 정의되었고 수치해석 관련 부분은 2.4.1 절의 경우와 모두 동일하며 전체 격자수는 약 4.7백만개이다.

Table 6 Simulation cases with respect to the azimuth angle



2.5 경계조건의 정의

신뢰성있는 수치해석을 수행하기 위해서는 해석 대상의 유체역학적 상황을 적절하게 모사할 수 있는 경계조건이 정의되어야 한다. 본 연구의 목적은 DP 작동 상황과 같은 선박이 정지한 상태 즉, 전진비(J)가 0인 Bollard 조건에서 추진기-선체에 의한 추력 손실을 예측해야 하는 경우, 적절한 경계조건을 정의하는 것이다. Funeno (2009)가 언급한 바와 같이, Bollard 조건에서의 수치해석은 매우 불안정하고 수렴성도 떨어지므로, 수치적 안정성을 위하여 인위적으로 작은 전진비를 정의해주어야 하는데 본 연구에서는 그 값을 0.05로 정의하였다. 또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 계산영역의 윗면(Top)과 아랫면(Bottom)에는 대칭(Symmetry) 경계조건이 정의된 상태에서, Fig. 9에 도시된 4개의 옆면에 각각 다음과 같은 2가지 형태로 부과하고자 한다. 즉, 첫번째 경계조건 부과 방법은 선체에 부착된 Azimuth thruster의 방향에 상관없이 항상 일관되게 선수방향의 면에 유입류조건(Velocity-Inlet)을, 선미방향의 면에 압력 유출조건(Pressure-Outlet)을 부과하는 것이다. 나머지 두 면에는 대칭(Symmetry) 경계조건을 부과하며, 이를 Fixed BC으로 명명하였다. 두 번째 경계조건 부과 방법은 선체에 부착된 Azimuth thruster의 방위 방향과 동일하게 유입 및 유출 조건을 측면에 부과하는 방법이다. 이를 Directional BC이라 명명하였다. 이해를 돕고자 Table 7에 대상선 중 하나를 대상으로 Table 5와 6

에서 언급한 방위각 중 일부를 선정해 경계조건을 나타내었다. 특히, 방위각 별로 유입조건을 주는 경우 Azimuth thruster의 방위각에 해당하는 만큼 X 방향, Y 방향으로 속도를 성분 분해하여 정의하였다.

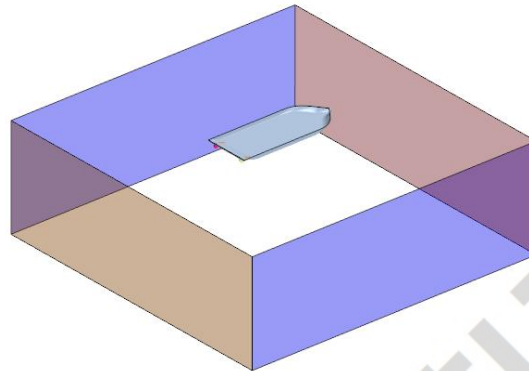


Fig. 9 Computational domain for the definition of the boundary condition

Table 7 Definition of different boundary condition

| Direction | Fixed BC | Directional BC |
|-----------|----------|----------------|
| 0° | | |
| 45° | | |
| 90° | | |

3. 수치 해석 결과

3.1 대상선 1 : WTIV

Fig. 10에는 서로 다른 경계조건이 부과된 상태에서 좌현에 부착된 모형 Azimuth thruster가 각 방위방향으로 작동할 때, 추진기를 포함한 선체 전체에서 계측된 X방향의 힘(F_{x_Hull})과 Y방향의 힘(F_{y_Hull}), 그리고 합력(F_{Total})을 프로펠러의 작동방위에 따라 각각 도시하였다. 합력(F_{Total})은 다음의 식 (1)로 정의하였다.

$$F_{Total} = \sqrt{(F_{x_Hull})^2 + (F_{y_Hull})^2} \tag{1}$$

또한 Table 8에는 모형시험 및 부과된 경계조건에서 산출된 수치해석 결과 중 F_{x_Hull} 과 F_{y_Hull} 의 값을 명기하였고, Table 9에는

F_{Total} 값과 모형시험과의 일치도를 나타내었다. 수치해석의 결과 전반적으로 시험결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 10(c)에서 알 수 있듯이, 합력(F_{Total})의 경우, 대략 75°에서 240° 사이에서는 추진기-선체 간의 간섭효과로 인하여 추력의 손실이 발생함을 알 수 있다. 경계조건 부과 방식에 따른 차이를 비교해보면, Fixed BC에서 산출된 합력(F_{Total})이 Directional BC에서 산출된 결과에 비해 모형 시험 결과에 더 근접한 결과를 보여주었다.

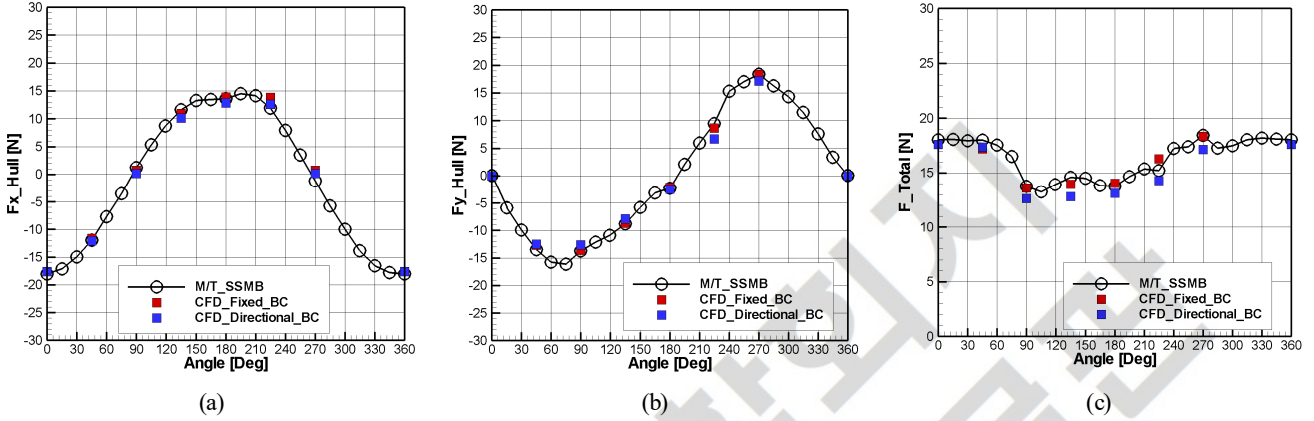


Fig. 10 Comparison of F_X_{Hull} (a), F_Y_{Hull} (b) and F_{Total} (c) with respect to azimuthing angle from CFD and model test

Table 8 Comparison of F_X_{Hull} , F_Y_{Hull} from M/T and CFD

| Method | M/T | | CFD | | | |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Fixed BC | | Directional BC | |
| Angle | F_X_{Hull} (N) | F_Y_{Hull} (N) | F_X_{Hull} (N) | F_Y_{Hull} (N) | F_X_{Hull} (N) | F_Y_{Hull} (N) |
| 0° | -18.1 | 0.1 | -17.6 | 0.0 | -17.6 | 0.0 |
| 45° | -12.0 | -13.5 | -11.6 | -12.7 | -12.1 | -12.5 |
| 90° | 1.2 | -13.7 | 0.8 | -13.6 | 0.2 | -12.6 |
| 135° | 11.6 | -8.8 | 10.9 | -8.7 | 10.1 | -7.9 |
| 180° | 13.6 | -2.3 | 13.9 | -2.1 | 12.9 | -2.5 |
| 225° | 11.9 | 9.5 | 13.8 | 8.6 | 12.6 | 6.7 |
| 270° | -1.2 | 18.4 | 0.7 | 18.3 | 0.2 | 17.2 |

Table 9 Comparison of F_{Total} from M/T and CFD

| Method | M/T | | CFD | | | |
|--------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|------|
| | | | Fixed BC | | Directional BC | |
| Angle | F_{Total} (N) | % | F_{Total} (N) | % | F_{Total} (N) | % |
| 0° | 18.1 | 100.0 | 17.6 | 97.5 | 17.6 | 97.5 |
| 45° | 18.0 | 100.0 | 17.2 | 95.5 | 17.4 | 96.4 |
| 90° | 13.8 | 100.0 | 13.6 | 99.1 | 12.6 | 91.9 |
| 135° | 14.6 | 100.0 | 14.0 | 95.7 | 12.8 | 87.8 |
| 180° | 13.8 | 100.0 | 14.0 | 101.9 | 13.1 | 95.2 |
| 225° | 15.2 | 100.0 | 16.3 | 107.2 | 14.3 | 94.0 |
| 270° | 18.5 | 100.0 | 18.4 | 99.5 | 17.2 | 93.0 |

Fig. 11을 통해 좌현 Azimuth thruster의 작동 방위각에 따라 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력 손실을 알 수 있고, Table 10에는 구체적 인 수치를 나타내었다. 모형시험 결과 90°와 180°에서 대략 30%, 20% 정도의 추력 손실이 각각 발생하고 있음을 알 수 있다. 수치해석 결과, 전반적으로 시험치와 유사한 경향을 보이고 있으나, 90°와 225°를 제외한 나머지 방위각에서 Fixed BC를 적용한 결과가 Directional BC를 적용한 결과에 비해 모형시험 결과에 더 근접하였다. 또한 Directional BC를 적용한 경우는 Fixed BC를 적용한 경우에 비해 추력 손실을 전반적으로 더 크게 예측하는 경향을 보임을 알 수 있다.

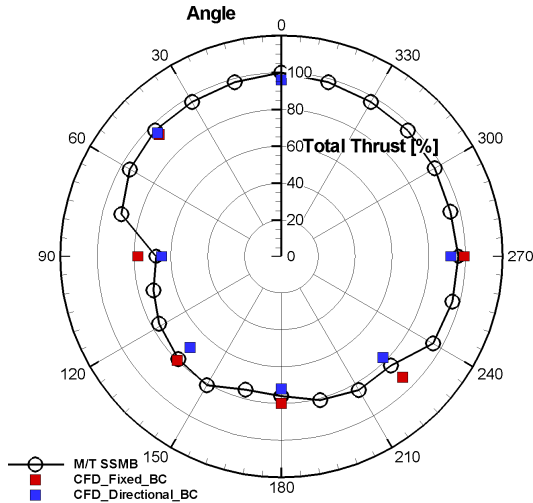


Fig. 11 Normalized total thrust on the azimuth angle

Table 10 Comparison of normalized total thrust on the azimuth angle from M/T and CFD

| Azimuth angle | M/T | Fixed BC |
|---------------|------|----------|
| 0° | 100% | 96% |
| 45° | 97% | 95% |
| 90° | 68% | 78% |
| 135° | 79% | 80% |
| 180° | 76% | 80% |
| 225° | 84% | 93% |
| 270° | 96% | 99% |

3.2 대상선 2 : FPSO

본 대상선의 경우에는 앞선 경우와 다르게 모형시험 없이 모형 스케일에서 수치해석만 수행되었다. 본 대상선박에는 3개의 Azimuth thruster가 부착되고, Table 6에 나타난 바와 같이 좌현 및 중간에 위치한 Azimuth thruster를 대상으로 추진기-선체 간섭효과에 의한 추력 손실에 대하여 해석을 수행하였다. 이 때 2기의 Azimuth thruster가 모두 고려되었던 WTIV의 경우와는 다르게, 본 대상선의 경우 Table 6에 나타난 바와 같이 1기의 Azimuth thruster가 좌현 및 중간에 각각 단독으로 설치되어 있는 상황으로 정의하였다. 또한 수치해석 시 고려된 Azimuth thruster의 작동 방위각은 총 5개로 0°, 45°, 60°, 75°, 110°이다.

Fig. 12는 Fig. 10과 유사하게, 서로 다른 경계조건이 부과된 상태에서 좌현과 중앙에 각각 독립적으로 위치한 모형 Azimuth thruster가 각 방위방향으로 작동할 때, 추진기를 포함한 선체 전체에서 계측된 X방향의 힘(F_x_{Hull})과 Y방향의 힘(F_y_{Hull}), 그리고 합력(F_{Total})을 프로펠러의 작동방위에 따라 도시하였고 Table 11에는 구체적인 수치를 명기하였다. 수치해석 결과, X방향의 힘(F_x_{Hull})은 Azimuth thruster의 부착위치 혹은 경계조건 부과 방식의 차이가 있음에도 전체적으로 유사한 수준의 값과 동일한 경향성을 나타내고 있다. 반면, Y방향의 힘(F_y_{Hull})의 경우, 동일한 경계조건이 부과된 상황에서는 Azimuth thruster의 부착 위치에 따라 큰 차이를 보이지 않았지만 동일한 위치에 설치된 Azimuth thruster의 경우라도 경계조건 부과 방식에 따라 결과는 큰 차이를 보였다. 특히, Directional_BC 조건이 부과된 상황에서 선체와 추진기를 포함하여 대상선 전체에 걸리는 Y 방향 힘(F_y_{Hull})의 크기는 Fixed_BC 조건의 결과보다 감소하였음을 알 수 있으며, 방위각이 75° 조건에서는 2배 정도의 차이를 보였다. 이로 인해 방위각에 따른 대상선 전체의 합력(F_{Total}) 분포도 경계조건 부과방법에 따라 차이를 보인다. Fixed_BC 조건의 경우 Azimuth thruster의 부착위치에 상관없이 일정한 수준의 합력이 예측된 반면, Directional_BC 조건이 부과된 경우 방위각이 증가함에 따라 전반적으로 합력(F_{Total})이 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 13에는 Fig. 11과 유사하게 좌현 및 중앙에 위치한 Azimuth thruster의 작동 방위각에 따라 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력손실을 무차원화하여 나타내었고, Table 12에는 구체적인 수치를 명기하였다. 앞서 언급한 Fig. 12(c)와 유사하게, 경계조건 부과 방식에 따라 무차원화된 전체추력의 분포도 다른 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 검토된 방위각을 대상으로 Fixed_BC가 부과된 경우, 최대 약 8% 정도의 추력손실이 발생할 것으로 예상된 반면, Directional_BC 조건이 부과된 경우에는 최대 63% 정도의 추력손실이 예상되었다.

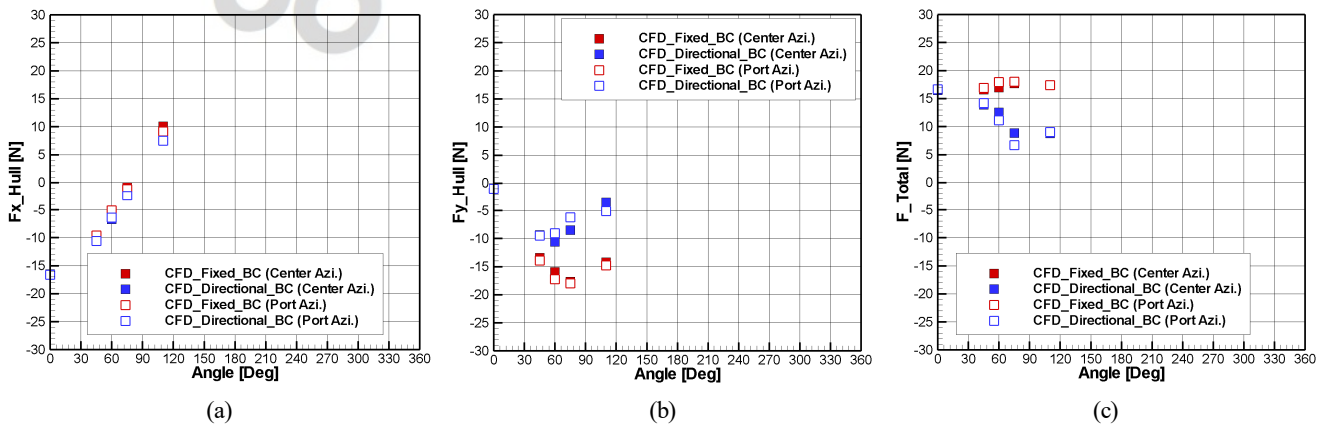


Fig. 12 Comparison of F_x_{Hull} (a), F_y_{Hull} (b) and F_{Total} (c) with respect to azimuth angle from CFD

Table 11 Comparison of F_{X_Hull} , F_{Y_Hull} from CFD

| Method | | CFD | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | Fixed BC | | | Directional BC | | |
| Azimuth thruster | Azimuth angle | F_{X_Hull} (N) | F_{Y_Hull} (N) | F_{Total} (N) | F_{X_Hull} (N) | F_{Y_Hull} (N) | F_{Total} (N) |
| Center | 0° | -16.5 | -0.9 | 16.5 | -16.5 | -0.9 | 16.5 |
| | 45° | -9.8 | -13.4 | 16.6 | -10.3 | -9.4 | 13.9 |
| | 60° | -5.7 | -16.0 | 16.9 | -6.7 | -10.6 | 12.5 |
| | 75° | -0.8 | -17.7 | 17.7 | -2.4 | -8.5 | 8.8 |
| | 110° | 10.0 | -14.2 | 17.4 | 8.0 | -3.6 | 8.8 |
| Port side | 0° | -16.6 | -1.0 | 16.7 | -16.6 | -1.0 | 16.7 |
| | 45° | -9.6 | -13.9 | 16.9 | -10.6 | -9.5 | 14.2 |
| | 60° | -5.1 | -17.2 | 18.0 | -6.4 | -9.1 | 11.1 |
| | 75° | -1.2 | -18.0 | 18.0 | -2.4 | -6.2 | 6.7 |
| | 110° | 9.1 | -14.8 | 17.4 | 7.5 | -5.1 | 9.1 |

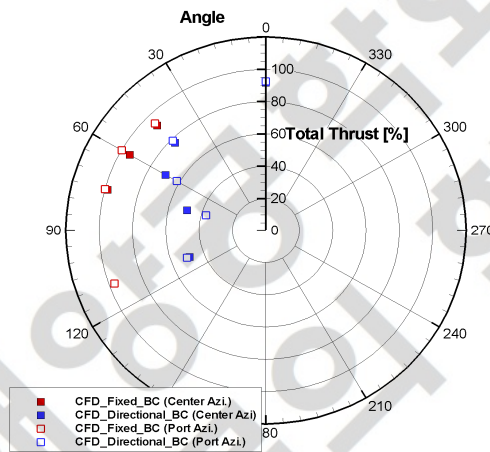


Fig. 13 Normalized total thrust on the azimuth angle

Table 12 Comparison of normalized total thrust on the azimuth angle from CFD

| Method | | CFD | |
|------------------|---------------|----------|----------------|
| Azimuth thruster | Azimuth angle | Fixed_BC | Directional_BC |
| Center | 0° | 91.7% | 91.7% |
| | 45° | 92.3% | 77.2% |
| | 60° | 94.2% | 69.5% |
| | 75° | 98.4% | 49.1% |
| | 110° | 96.8% | 48.8% |
| Port side | 0° | 92.6% | 92.6% |
| | 45° | 94.0% | 79.1% |
| | 60° | 99.9% | 61.7% |
| | 75° | 100.0% | 37.2% |
| | 110° | 96.6% | 50.3% |

특히, Azimuth thruster의 작동 방위각이 45°인 경우, 경계조건의 부과 방식에 따른 추력손실의 차이는 15% 정도였으나, 60° 이상인 조건에서는 경계조건의 부과방식에 따라 추정된 추력 손실의 차이가 급격하게 벌어지고 있으며 그 차이도 최대 약 2배까지 관찰되었다.

4. 고 찰

앞선 3장에서는 대상선 2척을 기준으로 경계조건 부과 방식에 따라 예측된 추력 손실을 비교하였다. 비교 결과 Table 9와 11에서 알 수 있듯이 추력 손실은 선종에 따라 차이를 보였다. WTIV의 경우에는 부과된 경계조건의 영향도가 상대적으로 작았지만, FPSO와 같은 경우에는 경계조건의 영향도가 컸으며, 예측된 추력 손실도, 일반적으로 알려진 수준을 상회하는 약 60% 까지 추정되었다. 본 절에서는 선

중에 따라 혹은 경계조건에 따라 추정된 추력손실의 경향이 큰 차이를 보인 원인에 대하여 고찰해보고자 한다.

앞서 언급한 Directional BC는 Azimuth thruster의 방위각에 따라, 유입류조건(Velocity-Inlet)과 압력 유출조건(Pressure-Outlet)이 계산영역의 측면에 각각 부과되는 방식이므로 대상선의 입장에서는 일정 방위각으로 흐르는 조류(Current) 속에 존재하는 상황과 동일하다. 즉, 0°의 방위각은 통상적으로 직진하는 상황에 해당하고, 90°의 방위각은 선박의 좌현에서 우현으로 조류가 흐르는 상황임을 의미한다. 실제 선박은 조류의 방향에 따라 저항이 발생하며 이를 조류저항(Current load)이라 한다. 본 연구에서도 이를 구하고자 별도의 수치해석을 추가적으로 진행하였다. Table 13, 14에는 대상선인 WTIV와 FPSO를 대상으로 각각의 방위각에 따른 조류저항을 X, Y 방향으로 구분한 C_x , C_y 와 합력(C_{Total})을 나타내었다. 이때 부과된 유속은 전진비 0.05를 정의할 때의 유속이며, Azimuth thruster는 부착되지 않은 상태에서 선박 고유의 조류저항을 산출하였다. Fig. 14에는 각 대상선에서 방위각 0°일 때의 조류저항의 합력(C_{Total})값을 기준으로 하여 각 방위각 별로 계산된 전체 저항을 무차원화하여 함께 나타내었다. Table 13, 14 및 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 선종에 따라 사항시 저항의 증가 정도가 큰 차이를 보인다. WTIV의 경우, 방위각이 0°일 때의 합력(C_{Total})을 기준으로 하여 방위각이 90°일 때는 최대 약 4배 정도 증가된다. 반면, FPSO의 경우, 방위각이 0°일 때의 합력(C_{Total})을 기준으로 하여 방위각이 75°일 때는 최대 약 20배 큰 저항값을 보인다. 그리고 조류의 방향에 따른 저항값 자체의 크기도 선종에 따라 큰 차이를 보이는데 FPSO는 WTIV에 비해 약 10배 이상 크음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 유추할 수 있는 것은 수치해석 시 대상선에 부착된 Azimuth thruster가 추력을 일정하게 산출하더라도 선박의 조류저항이 지나치게 커지면 결과적으로 선박에게 유효한 전체추력(F_{Total})은 크게 감소된다는 점이다. 특히, 조류저항의 크기는 선박의 특성 예를 들면, 선종, 선형, 부가물, 흡수 등에 따라 매우 달라질 수 있다. Fig. 15에는 각 대상 선박의 좌현 45° 방위각에서 조류가 들어오

Table 13 Current load with respect to azimuthing angle on WTIV

| Angle | C_x (N) | C_y (N) | C_{Total} (N) | [%] |
|-------|-----------|-----------|-----------------|-----|
| 0° | 0.064 | 0.000 | 0.064 | 100 |
| 45° | 0.056 | 0.149 | 0.159 | 250 |
| 90° | 0.003 | 0.241 | 0.241 | 378 |
| 135° | -0.061 | 0.152 | 0.164 | 258 |
| 180° | -0.069 | 0.000 | 0.069 | 109 |
| 225° | -0.060 | -0.152 | 0.163 | 256 |
| 270° | 0.003 | -0.241 | 0.241 | 380 |

Table 14 Current load with respect to the azimuth angle on FPSO

| Angle | C_x (N) | C_y (N) | C_{Total} (N) | (%) |
|-------|-----------|-----------|-----------------|-------|
| 0° | 0.532 | 0.000 | 0.532 | 100 |
| 45° | 0.396 | 4.959 | 4.975 | 935 |
| 60° | -0.119 | 8.207 | 8.208 | 1,543 |
| 75° | -0.862 | 10.673 | 10.708 | 2,013 |
| 110° | 0.329 | 9.760 | 9.765 | 1,836 |

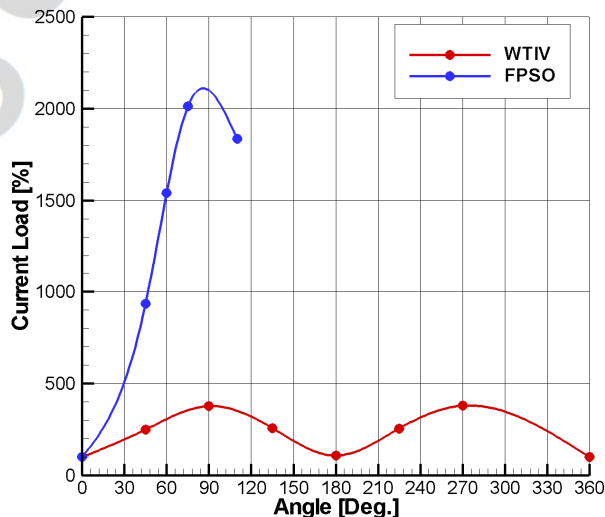


Fig. 14 Comparison of the normalized current load with respect to the azimuth angle on WTIV and FPSO

는 조건에서 산출된 선체의 무차원 압력계수 분포를 나타낸 것으로 분포 형태가 대상선에 따라 다른 특징을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 추진기-선체 상호간섭에 의한 추력손실을 예측하는 수치해석을 수행하는 경우, 계산영역의 측면에는 불필요하게 대상선의 큰 조류저항 이 유도되고 이로부터 비현실적으로 큰 추력손실이 추정되는 Directional_BC보다 Fixed_BC이 부과되는 것이 타당하다. Fixed_BC가 부과되는 경우, 수치적 안정성을 위해 인위적으로 정의되는 작은 전진비의 해당 유속이 부과되며 실제로 이 유속은 매우 낮으므로 조류저항 (Current load)의 영향을 최소화할 수 있다. Table 10에 나타낸 바와 같이 대상선이 WTIV인 경우, 수치해석을 통해 추정된 추력의 손실은 모형시험 결과와 잘 일치하였다. 또한 Table 12에 나타낸 바와 같이 대상선이 FPSO인 경우에도 Azimuth thruster의 설치 위치에 상관없이 방위각에 따른 추력의 손실이 10% 이내로 추정되었다. 또한 Fixed_BC가 경계조건으로 부과되었을 때 대상선 중 하나인 FPSO가 나머지 대상선인 WTIV에 비해 상대적으로 추력의 손실이 적게 예측되었다. 그 원인으로서는 첫째, Azimuth thruster가 선체로부터 하방으로 돌출된 Head box 하부에 설치되어 있어 상대적으로 선체와의 거리가 멀어졌다는 점과 둘째, 본 연구에서 적용된 Azimuth thruster의 덕트는 하방으로 회전(Tilt) 되어 있어 Coanda effect를 줄일 수 있었다는 점 등이 있다. 그리고 근본적으로 해양구조물이나 특수선에서 추진기-선체 상호간섭으로 인한 과도한 추력 손실을 방지하기 위해서는 Azimuth thruster의 후류 방향과 선체 간의 간섭이 최소화되는 Azimuth thruster의 최적 배치, 적절한 용량의 Azimuth thruster의 선정 및 DP 제어 알고리즘을 고도화 등이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 추진기-선체간 상호간섭으로 인한 추력손실을 수치해석적인 방법으로 추정함에 있어서, 두 척의 대상선을 기준으로 서로 다른 경계조건을 부과하고, 예측된 추력손실을 비교하였다. 이를 통해, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 추진기-선체 간섭으로 인한 추력 손실을 수치해석적인 방법으로 추정하는 경우, 방위각 0°에서의 경계조건과 같이 선수 및 선미 방향의 계산영역에 유입류 조건과 압력 유출조건을 부과하는 것이 실용적임을 확인하였다. 이와 다르게, Azimuth thruster의 작동 방위 방향에 따라 속도 유입류 조건과 압력 유출 조건을 부과하는 경우에는 의도치 않은 선체의 조류저항이 발생하여, 결과적으로 추력손실이 과도하게 예측될 수 있다.

(2) 앞서 언급한 경계조건이 수치해석 시 부과되더라도, 선종, 선형, 각종 부가물 및 Azimuth thruster의 배치 등에 따라 추진기-선체 간섭효과로 인한 추력의 손실은 차이를 보일 수 있음을 확인하였다. WTIV의 경우, 약 30% 정도의 추력손실이 예상되었으나, FPSO의 경우, 고려된 Azimuth thruster의 방위각에서는 10% 이내의 추력손실이 예상되었고, Azimuth thruster의 부착위치(선박의 좌현 혹은 중앙)에 따른 차이도 최대 약 5% 정도였다.

향후 추가적인 연구가 필요한 부분으로는 첫째, 모형시험을 통한 추가적인 검증 데이터의 확보, 둘째, 대상 선박의 운동성능에 대한 고려, 셋째, 흘수가 작은 선박일 경우 추진기와 자유 수면 간의 간섭효과 추정 등이 있다고 사료된다.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interests.

후 원

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 20213030020200, 과제명: 부유식 해상풍력시스템 통합하중해석 프로그램 개발)

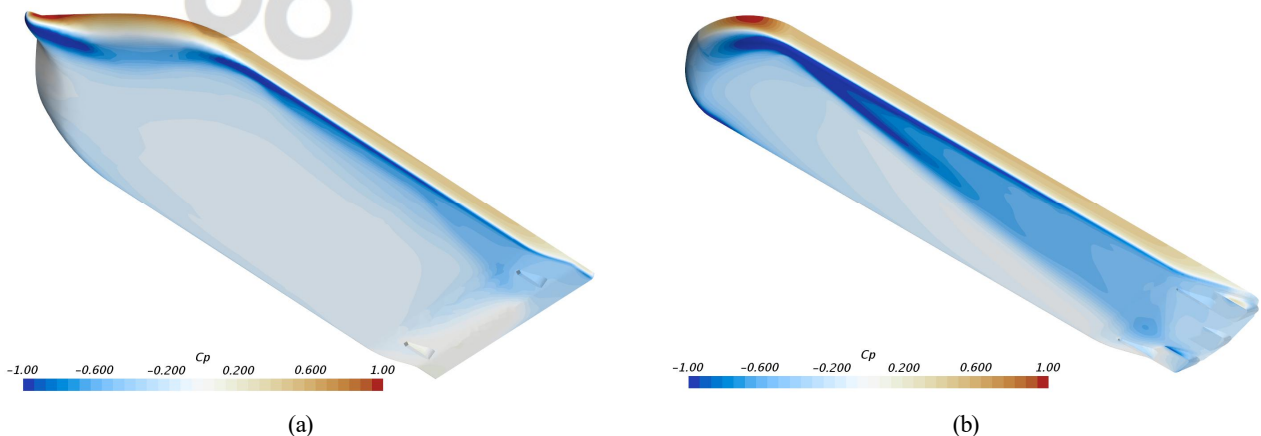


Fig. 15 Distribution of pressure coefficient on 45° current condition (a) WTIV, (b) FPSO

References

- Cozijn, H. Hallmann, R., & Koop, A. (2010). Analysis of the velocities in the wake of an azimuth thruster, using PIV measurements and CFD calculations. In *Dynamic Positioning Conference, Houston, USA*.
- Dang, J., & Laheij, H. (2004). Hydrodynamic aspects of steerable thrusters. In *Dynamic Positioning Conference, Houston, USA*.
- Funeno, I. (2009). Hydrodynamic optimal design of ducted azimuth thrusters. In *First International Symposium on Marine Propulsion, SMP09, Trondheim, Norway*.
- Lehn, E. (1980). *Thruster interaction effect* (NSFI Report-102.80). The Ship Research Institute of Norway.
- Nienhuis, U. (1992). *Analysis of thruster effectivity for dynamic positioning and low speed manoeuvring* [Doctoral dissertation, Technical University Delft].
- Ottens, H., van Dijk, R., Meskers, G. (2011). Benchmark study on thruster-hull interaction on a semi-submergible crane vessel. *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, Netherlands, 297-307*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49433>
- Palm, M., Jurgens, D. & Bendl, D. (2010). Comparison of thruster axis tilting versus nozzle tiling on the propeller-hull interactions for a drillship at DP-condition. In *Dynamic Positioning Conference, Houston, USA*.
- Song, G. S., Kim, H. J., Park, H. G., Seo, J. S. (2013). The investigation for interaction phenomenon of azimuth thruster on ship. *Proceedings of the PRADS2013, Changwon, Korea*.
- Song, G. S., Kim, J. S., & Kim, H. J. (2022). The study of thrust loss by thruster-hull interaction on azimuth thruster. *Proceedings of the 12th National Congress on Fluids Engineering, Changwon, Korea*.

Author ORCIDs

| Author name | ORCID |
|----------------|---------------------|
| Song, Gi Su | 0000-0002-5424-4794 |
| Lee, Seung Jae | 0000-0001-8992-6915 |
| Kim, Ju Sung | 0000-0003-4719-4167 |