



자유수면 부근에 위치한 아지무스 스러스터의 유체역학적 성능 연구

서영수¹ · 송지수^{2,†}

삼성중공업(주) 선박해양연구센터¹

국립한국해양대학교 조선해양시스템공학부²

A Study of Hydrodynamic Performance on Azimuth Thruster Around Free Surface

Yongsu Seo¹ · Gisu Song^{2,†}

Ship & Offshore Performance Research Center, Samsung Heavy Industries Co., LTD.¹

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, National Korea Maritime and Ocean 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.

The importance of renewable energy is on a rapidly increasing and WTIV become a important vessel in off-shore wind power. For the DP operation, the WTIV has the azimuth thruster which is generally assembled by some parts such as leg, duct, propeller, and housing. During operating on low draft in the WTIV, especially, it is important to examine the influence of the free surface on azimuth thruster's performance. Therefore, In this study, the azimuth thruster with free surface were mainly studied based on the numerical method. So, The immersion ratio(T/D) was defined for analyzing the influence of the free surface, where T is the distance from the free water surface to the propeller rotation axis, and D is the diameter of the propeller on the azimuth thruster. In this study, three immersion ratios($T/D = 0.75, 1.0, \text{ and } 1.25$) and deep sea conditions were considered. Based on the numerical simulations, the hydrodynamic performance of the azimuth thruster, the free surface in spanwise and streamwise directions, eccentric forces and moments of propeller in the azimuth thruster were discussed.

Keywords : Azimuth thruster(아지무스 스러스터), Free surface(자유수면), Immersion ratio(침수깊이버), Leg(다리구조물), Advance ratio(전진비)

1. 서론

전 세계적인 기후 위기에 대응하고자 선진국을 비롯한 많은 나라들은 석탄, 석유 기반의 화석연료 사용을 줄이면서, 친환경 에너지의 개발을 확대하고 있으며 이와 관련된 분야의 연구와 투자도 활발히 이루어지고 있다. 다양한 신재생 에너지원 중 가장 대중화된 것은 풍력으로 다양한 발전 방법 중에서 풍력발전이 차지하는 비중도 점차 증가하고 있다. 특히 주로 육상에 건설되던 풍력 발전기는 바람의 질적, 양적 측면에서 유리한 해상으로 설치 위치가 점차 이동하는 추세이다. 그리고 최근에는 육지에서 더욱 멀리 떨어진 바다에 부유식 풍력발전시설을 설치하는 프로젝트도 진행되고 있다. 해상에 발전기를 설치하기 위해선 Fig. 1에 도시한 풍력발전기 설치선(WTIV)라는 특수 선박을 이용해야

하고, 이 선박의 발주 규모도 점차 증가하고 있다. 원하는 지점에 풍력 발전기를 설치하려면 WTIV는 동적 제어를 통해 위치를 유지해야 하는데 이 기능을 DP라고 하며, 이를 위해 일반적으로 WTIV에는 아지무스 스러스터(Azimuth thruster)라는 특수추진기가 부착된다. 아지무스 스러스터는 WTIV 뿐만 아니라 부유식 생산저장하역설비(FPSO), 반잠수식 시추선(Semi-submersible), Tug 등에도 폭넓게 사용되는 추진시스템이다.



Fig. 1 Example of WTIV

아지무스 스러스터는 단독 상태의 성능과 관련된 연구와 함께 간섭효과에 대한 연구도 많이 수행되었다. Funeno (2009)은 유체역학적인 성능 개선을 위해 하우징(housing)의 형태를 변형시켜가면서 연구를 수행하였다. Bulten (2006)은 CFD 방법을 활용하여 기존 19A 형태의 아지무스 스러스터 덕트 형상보다 향상된 추진성능을 산출하는 덕트형상을 제안하였고, 모형스케일 및 실선스케일 간의 성능 변화에 대해서도 연구하였다. Dang and Laheij (2004)은 아지무스 스러스터가 선박, 해양구조물 등에 장착되는 경우, 여러 가지 상호간섭효과로 인하여 단독 상태일 때 대비 성능이 저하되는 현상에 대해 언급하였다. 대표적인 간섭효과로 추진기-추진기 간의 상호간섭(thruster-thruster interaction), 추진기-선박 간의 상호간섭(thruster-hull interaction), 추진기-파 간의 상호간섭(thruster-wave interaction), 추진기-조류 간의 상호간섭(thruster-current interaction) 등이 있다. 이 중에서 추진기-추진기 간의 상호간섭과 추진기-선박 간의 상호간섭에 대한 연구는 오랜기간 동안 많이 진행되었다. 특히 Lehn (1980)은 모형시험을 통하여 추진기-추진기 간의 상호간섭 효과에 대한 연구를 진행하였는데 두 아지무스 스러스터 간의 거리, 전방 아지무스 스러스터의 각도 등을 변화시키면서 후방 아지무스 스러스터의 추력성능이 어떻게 변화하는지 고찰하였다. DP 성능의 정확한 추정을 위해서는 추진기-선체 간의 간섭에 의한 추력손실도 반드시 고려해야 한다. 이에 대한 연구는 대표적으로 Song et al. (2013), Ottens et al. (2011)이 있으며, 아지무스 스러스터의 후류가 선체에 부착되면서 선박의 저항이 증가되는데 이는 일반적으로 잘 알려진 코안다 효과와 동일하다. 이 현상을 감소시키기 위하여 아지무스 스러스터의 덕트 각도를 하방으로 일정 각도만큼 기울이는 방안이 많이 적용되었다. 최근에는 아지무스 스러스터의 프로펠러와 덕트를 함께 기울이는 방식으로 제작된 제품들도 개발되었다. Bulten and Stoltenkamp (2016)은 덕트 프로펠러에서 덕트만 5도 기울어진 추진기와 기어를 중심으로 프로펠러와 덕트 모두 8도 기울어진 추진기를 수치해석적으로 분석하여 DP 성능을 비교하는 연구를 수행한 바 있다.

앞서 언급한 추진기-추진기 상호간섭, 추진기-선체 상호간섭에 비해 자유수면의 영향에 관한 연구는 상대적으로 많이 수행되지 않았다. Palm et al. (2011)은 아지무스 스러스터가 수면 근처에 위치한 상태에서 작동할 때 공기가 빨려들어오는 벤틸레이션(ventilation) 현상에 대해 실험과 CFD를 이용하여 연구하였다. Song and Lee (2022)는 아지무스 스러스터와 형태적으로 유사한 축대칭 덕트 프로펠러를 대상으로 자유수면이 유체역학적 성능에 미치는 영향도를 분석한 바 있다. 아지무스 스러스터가 설치되는 다양한 선박 중에서도 특히 WTI는 상대적으로 낮은 흘수와 광폭의 선형을 가지고 있으므로, 추진시스템에 미치는 자유수면의 영향도가 다른 선종에 비하여 크다는 제원적 특성이 있다.

따라서 본 연구에서는 아지무스 스러스터 작동 시 자유수면이 아지무스 스러스터에 미치는 영향도를 다양한 관점에서 분석하고자 한다. 이를 위해 자유수면으로부터 아지무스 스러스터의 프로펠러가 잠긴 정도를 의미하는 침수 깊이를 정의하고 이를 변화시켜 가면서 추진성능 및 프로펠러 편심력이 어떻게 변화하는

지 고찰하였다. 또한, 아지무스 스러스터의 다리구조물(leg)의 존재 유무 및 전진비에 따라 성능과 자유수면의 형태가 어떤 차이를 보이는지 연구하였다.

2. 수치해석기법 정의

2.1 해석대상

본 논문의 연구 대상인 아지무스 스러스터는 19A 형상의 덕트와 KA4-70 프로펠러로 구성되어 있으며 각 부분의 명칭은 Fig. 2에 도시하였다. 특히, 앞서 언급한 추진기-선체 상호간섭 효과를 방지하기 위해 덕트만 5도 기울어진 형상을 가지고 있다. 일반적으로 아지무스 스러스터의 단독성능시험(POW) 수행 시에는 자유수면의 영향을 배제시키고자 상부에 판(plate)이 부착되며 본 연구에서도 모형시험과의 상사성을 위하여 수치해석 시에도 고려하였다.

본 연구에서는 아지무스 스러스터가 충분히 깊이 잠긴 상태에서 수행된 Song et al. (2013)의 단독상태 모형시험 결과가 격자계, 수치해석기법의 검증 시 비교 데이터로 활용되었다. 모형시험과 관련한 ITTC Guideline (2014)에 언급한 바와 같이 통상적으로 자유수면에서 프로펠러의 회전축까지의 거리가 추진기 직경의 1.5배 이상이면 자유수면의 영향을 배제할 수 있다고 알려져 있으며 본 논문에서는 충분히 잠겨 있는 조건이라고 표현하였다. 그리고 특수추진기의 프로펠러 직경은 0.14m, 회전수는 15 rps로 정의되었다.

일반적으로 아지무스 스러스터는 크게 저항체와 추력체로 나눌 수 있는데, 하우징(housing) 및 다리구조물(leg)은 저항체이고 덕트(duct) 및 프로펠러(propeller)가 추력을 산출하는 부분이다. 따라서 아지무스 스러스터의 전체 추력계수(K_{TP})는 프로펠러 추력계수(K_{TP}), 덕트 추력계수(K_{TD}), 저항계수(K_{Drag})로 구성된다.

2.2 해석기법

본 연구에서는 상용 유체해석 프로그램인 STAR CCM+ 15.06을 이용하여 수치해석을 수행하였다. CFD 해석은 단독성능 계측 모형시험 시와 동일한 레이놀즈수 (약 2.7×10^5)에서 수행되었고 캐비테이션(cavitation)은 고려되지 않았다. Song and Lee

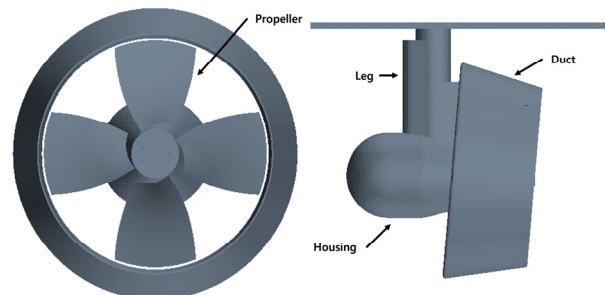


Fig. 2 Azimuth Thruster

(2022)의 연구를 기반으로 본 연구에서도 *Realizable k-ε* 난류모델이 적용되었으며 자유수면은 VOF기법으로 묘사되었다.

2.3 계산영역 정의

본 연구에서 적용된 계산영역은 Fig. 3과 같이 프로펠러 직경 (D)으로 무차원화하여 표현하였고 흐름방향으로 16D, 폭방향 8D, 높이방향 7D로 설정하였다. 영역에 대한 경계 조건은 기존 Song and Lee (2022)의 연구를 바탕으로 제작하였고 양 측면 (side)으로는 대칭조건(symmetry), 전방면(front)과 상/하방면(top and bottom)으로는 속도유입조건(velocity inlet), 후방면(rear)에는 압력유출조건(pressure outlet)을 적용하였다.

2.4 격자 테스트

본 연구에서 사용된 격자계의 신뢰성을 확보하고자, 단독상태에서 진행된 모형시험 결과를 활용하였다. 격자 테스트 시에는 프로펠러가 직접 회전하는 모사기법(Sliding Mesh)을 사용되었다. 또한 Table 1과 같이 기준크기 (base size) 값을 $\sqrt{2}$ 배씩 변화시켰으나 추진기 표면에서의 경계층 두께는 동일하도록 정의하여 동일한 벽함수가 작동되도록 설정하였다. 추진기의 설계 전진비를 고려해서 전진비(J), 0.5에서 전체 추력계수(K_T)를 비교하였으며 마지막 3바퀴를 기준으로 평균한 수치를 적용하였다. Fig. 4와 같이 격자계는 비정렬 격자계(trimmer Type)로 제작하였으며 총 격자 개수는 Table 1에 나타내었다.

ITTC (2008)에서 제안한 격자 불확실성 분석방법을 활용하여 격자테스트 결과를 분석하였다. 적절한 격자계를 찾기 위해 Coarse, Medium, Fine grid에서 산출된 추력계수를 각각 S_1 , S_2 , S_3 로 정의하였고 Seo et al. (2016)이 언급한 바와 같이 식 (1)을 이용하여 R_G (Convergence Ratio), P_G (Order of Accuracy), δ_{RE} (Corrected Error), C(Correction Factor), U_G (Grid Uncertainty)를 순차적으로 계산하였다. 본 연구에서는 R_G 가 0.68이기 때문에 단조 수렴으로 판단할 수 있고 본 검증과정을 적용할 수 있다. 다음으로 P_G 는 1.11, δ_{RE} 는 9.785×10^{-3} , C값은 0.47 이라는 결과를 순차적으로 얻었고 최종적으로 U_G 는 9.785×10^{-3} 로 계산되었다. Table 2와 같이 각 경우의 최대 오차가 2.73%로 U_G

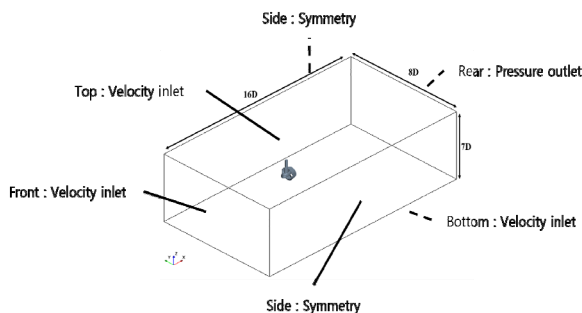


Fig. 3 Computational domain

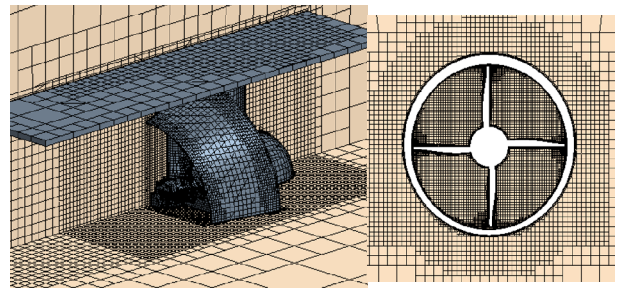
보다 낮게 계산되었기 때문에 검증된 격자로 판단할 수 있고 이에 따라 본 연구는 medium 격자계를 모두 적용하여 계산하였다.

Table. 1 Total mesh of cases

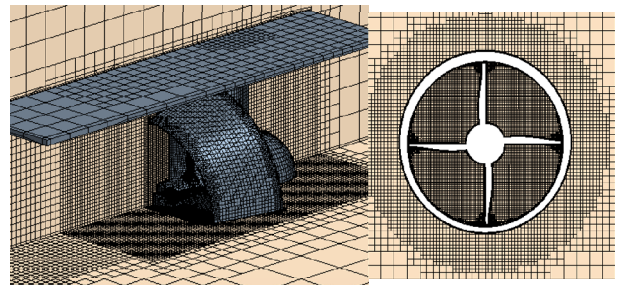
Grid	Coarse	Medium	Fine
Base size [m]	0.707	1	1.414
Total cells	1.25 M	2.49 M	5.68 M

Table. 2 The comparison of errors on the KTT

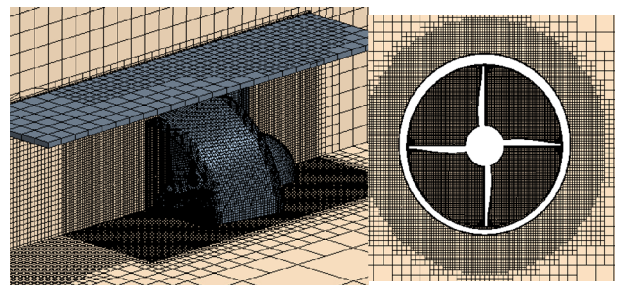
Items	K_T	Error [%]
Model test	0.2413	-
Coarse grid	0.2365	-1.98 %
Medium grid	0.2411	-0.07 %
Fine grid	0.2479	2.73 %



(a) Coarse grid



(b) Medium grid



(c) Fine grid

Fig. 4 Grid system for grid test

$$R_G = \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2}$$

$$\begin{cases} 0 < R_G < 1, & \text{Monotonic convergence} \\ R_G < 0, & \text{Oscillatory convergence} \\ R_G > 1, & \text{Divergence} \end{cases}$$

$$P_G = \ln(R_G^{-1}) / \ln(R_G)$$

$$\delta_{RE} = \frac{S_2 - S_1}{R_G^{P_G} - 1} \quad (1)$$

$$C = \frac{R_G^{P_G} - 1}{R_G^{P_{G,est}} - 1}$$

$$U_G = |C \cdot \delta_{RE}| + |(1 - C) \cdot \delta_{RE}|$$

3. 해석대상의 정의

3.1 직접회전방법의 적용

본 연구에서는 이동참조프레임(MRF)기법으로 초기 유동장을 안정시킨 후에 프로펠러 직접회전방법을 적용하여 계산의 정확도를 높였다. 또한, 이전 연구에서 Song and Lee (2022)은 시간 간격(time step)을 조정하며 덕트 프로펠러에 대한 수치 평가를 실시한 바 있는데 그 연구에서 시간 간격당 회전각도가 3도보다 작을 경우에는 결과 수치의 변화는 크게 발생하지 않았음을 보였다. 이를 기반으로 본 연구에서도 동일한 시간 간격을 부여하였다.

3.2 해석대상의 정의

앞서 언급한 바와 같이 Song et al. (2013), Ottens et al. (2011)은 추진기-선체 상호간섭 효과를 줄이기 위해 아지무스 스러스터의 덕트가 기울어진 형태를 연구한 바 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 사용된 아지무스 추진기도 덕트만 기울어진 형태를 기본 형상으로 정의하였다. 이를 시작으로 하여 덕트의 기울임 효과, 자유수면의 영향을 줄이기 위한 상부 평판, 다리구조물의 영향을 확인하고자 Fig. 5과 Table 3에는 아지무스 스러스터의 부분 별 변화를 나타내었다. 즉, N1과 N2는 덕트 기울기 각도차이, N2와 N3는 상부 판(Upper plate) 유/무, N3과 N4는 다리구조물 유/무의 차이가 있다.

또한 자유수면의 간섭효과를 확인하기 위하여, Fig. 6에 나타난 바와 같이 추진기가 자유수면에서 잠긴 깊이를 침수깊이비(immersion ratio, T/D)로 정의하였다. 즉, 침수깊이비는 자유수면에서 프로펠러 회전 중심축까지 거리를 T로 정의하고 이를 직경(D)으로 무차원한 값을 의미한다. 침수깊이비는 0.75, 1.00, 1.25로 3가지로 정의하였다. 또한 Fig. 7과 같이 N3, N4 형상을

Table. 3 Description of geometry in azimuth thruster

Simulation cases	N1	N2	N3	N4
Tilting degree [deg.]	5	0	0	0
Upper plate	O	O	X	X
Leg	O	O	O	X

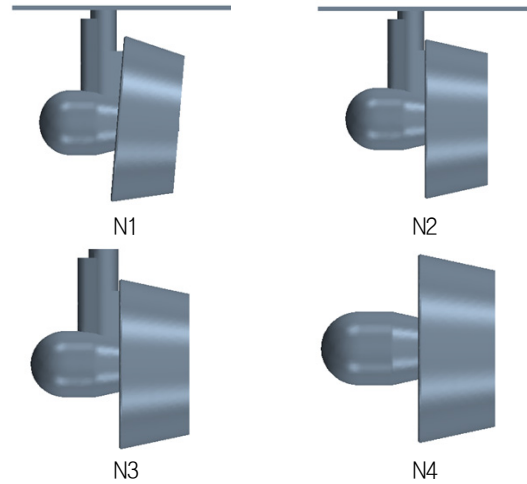


Fig. 5 Various geometries of the azimuth thruster

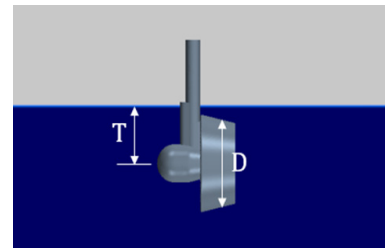
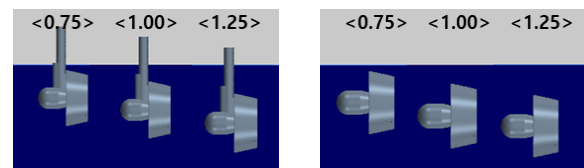


Fig. 6 Definition of immersion ratio

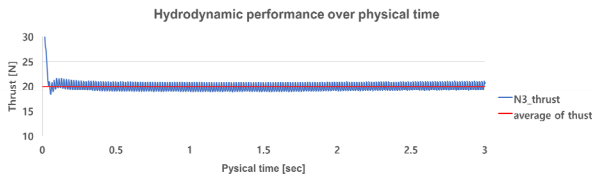


(a) Simulation with leg (b) Simulation without leg
Fig. 7 Azimuth thruster with free surface

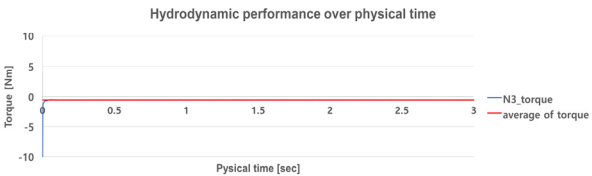
대상으로 자유수면을 고려하여 다리구조물 유/무 및 전진비의 영향 등에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Song and Lee (2022)의 연구에서 사용된 자유수면 부근의 격자계는 본 연구에서도 동일하게 적용하였으며 자유수면 부분을 포함한 총 격자의 개수는 약 3.2백만개이다.

3.3 시간 수렴성 평가

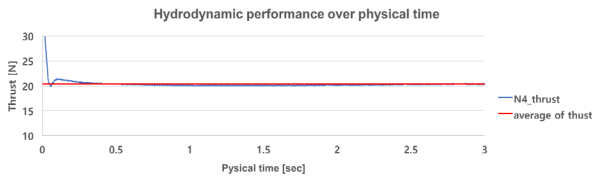
다음으로 적절한 해석 시간을 정의하기 위해 시간에 대한 수렴성을 확인하였다. 즉, 자유수면이 고려된 상황에서 N3, N4 형



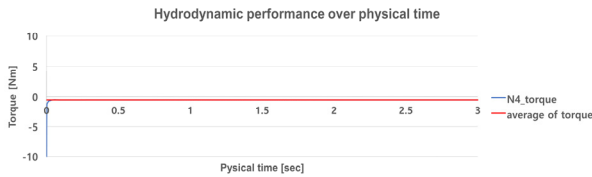
(a) The thrust of N3



(b) The torque of N3



(c) The thrust of N4



(d) The torque of N4

Fig. 8 The results of the time convergence test

상에 대해 추력 및 토크의 시간에 대한 변화 및 시간 평균값을 Fig. 8에 도시하였다. 특히, 침수깊이비가 가장 작은 0.75일 때 자유수면의 변화가 가장 클 것으로 예상되므로 이 조건을 기준으로 선정하였고 전진비(J)는 0.5일 때로 정의하였다. Fig. 8의 (a)와 (b)는 각각 N3 형상에 대한 추력 및 토크가 Fig. 8(c)와 (d)는 N4 형상에 대한 추력 및 토크가 도시되어 있다. 수치해석 결과, 약 2초(약 30회전) 이후부터 추력 및 토크는 평균값 대비 약 5% 이내 수준으로 섭동하거나 수렴함을 확인하였다. 본 연구에서 모든 해석 케이스의 해석을 3초까지 수행함으로써 충분히 안정화된 결과를 도출할 수 있었다.

3.4 프로펠러 편심력 정의

본 절에서는 아지무스 스러스터의 프로펠러 편심력에 대해 정의하고자 한다. Fig. 9에 도시한 바와 같이 Y축을 기준으로 발생하는 모멘트를 수평 모멘트(H_M), Z축을 기준으로 발생하는 모멘트를 수직 모멘트(V_M)로 정의하였다.

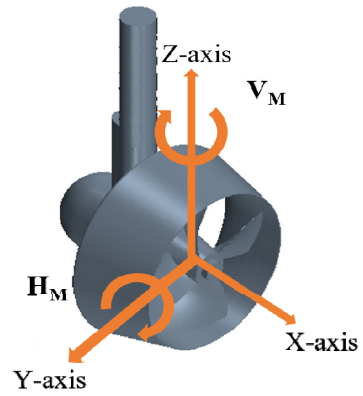


Fig. 9 Definition of axis on propeller in azimuth thruster

4. 해석 결과

4.1 단독상태해석

Fig. 10는 직접회전 방식으로 산출된 전체 추력계수(K_{TT}), 토크 계수(K_o), 효율(η_o)을 모형시험 결과와 함께 전진비 0.1에서 0.6까지 도시한 것이다. 수치해석의 경우 전체적으로 토크는 모형시험치 대비 크게 예측되었고, 전체 추력의 경우 전진비 변화에 따라 기울기가 다소 교차되는 특성을 보였다. 다만, 아지무스 스러스터의 설계 전진비인 0.5에서 예측된 수치해석 결과의 K_{TT} 는 모형시험 결과와 0.5% 이내의 오차를 가지는 것을 확인하였다. 이를 기준으로 형상변화 시 어떤 성능상의 변화가 유도되는지 확인하였다.

4.2 형상 변화에 따른 결과 비교

Table 4는 앞서 언급한 아지무스 스러스터의 형상별 변화에 따른 유체역학적 성능 차이를 나타내었다. 이 전진비(J=0.5)는 전체 추력에서 덕트가 차지하는 비중은 상대적으로 작은 환경임을 알 수 있다. N1에서 N2로의 변화와 같이 덕트의 기울기가 0도로 변하면, 덕트 추력계수(K_{TD})가 증가함을 알 수 있다. 다만, 프로펠러의 추력

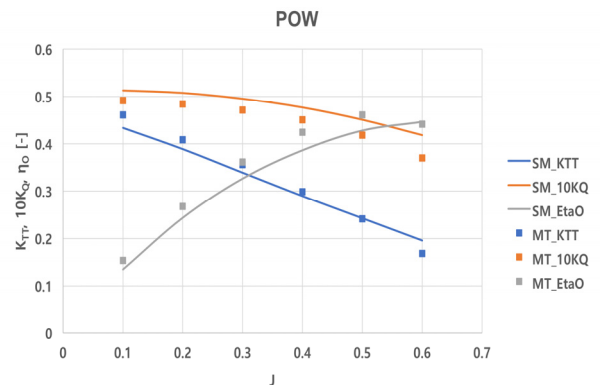


Fig. 10 Comparison of the performance curve of N1 geometry

Table 4 The variation of tilting degree in J = 0.5

Simulation cases	N1	N2	N3	N4
KTT	0.2424	0.2397	0.2433	0.2518
	100.0%	98.9%	100.4%	103.9%
KTP	0.2423	0.2414	0.2430	0.2399
	100.0%	99.6%	100.3%	99.0%
KTD	0.0562	0.0593	0.0616	0.0475
	100.0%	105.5%	109.6%	84.5%
10KQ	0.4508	0.4514	0.4536	0.4487
	100.0%	100.1%	100.6%	99.5%
η_o	0.4279	0.4226	0.4268	0.4466
	100.0%	98.8%	99.7%	104.4%

계수(K_{TP})가 감소함을 알 수 있는데 이로부터 추진기로의 유입류 특성이 변화하였음을 예측할 수 있다. 또한 형상이 N2에서 N3로 변화하면, 전체 추력값(K_T)과 토크계수(K_Q)가 증가하는 경향을 보였다. 특히, N3에서 N4로의 변화는 다리구조물 형상의 유/무를 뜻하는데 다시말해 축대칭 형상으로 변경되었음을 의미한다. 다리구조물이 있는 경우(N3)에 비하여 다리구조물이 없으면 전추력계수 (K_T)는 증가하고 덕트 추력계수(K_{TD})와 토크계수(K_Q)는 감소되는 경향을 보였다. 이는 저항체 역할을 하는 다리구조물이 사라짐으로 인해 즉, 축대칭 형상이 되면서 결과적으로 효율(η_o)이 증가됨을 확인하였다.

4.3 다리 구조물 유무에 따른 프로펠러의 침수깊이비별 편심력 비교

다음으로 침수깊이비 변화에 따른 프로펠러의 편심력의 변화를 살펴보고자 한다. Fig. 11에는 전진비 0.5 조건에서 다리구조물 유무에 따른 모멘트 변화를 도시하였다. ‘O’ 값은 축대칭인 N4 형상, ‘+’ 값은 다리구조물을 가진 N3 형상에 대한 모멘트 값이다. 또한, X축은 침수깊이비, Y축은 수평 모멘트(H_M) 및 수직 모멘트(V_M)를 축방향 토크로 무차원화 하여 도시하였다. 다리 구조물의 유무에 따라 프로펠러의 편심력의 특성은 변화되고 있음을 알 수 있다. 즉, 다리구조물이 있는 경우, 침수깊이비에 상관없이 수직 모멘트(V_M)는 양의 값을 보이지만 다리구조물이 없으면, 0 근처의 값을 가진다. 그리고 침수깊이비가 작을수록 즉,

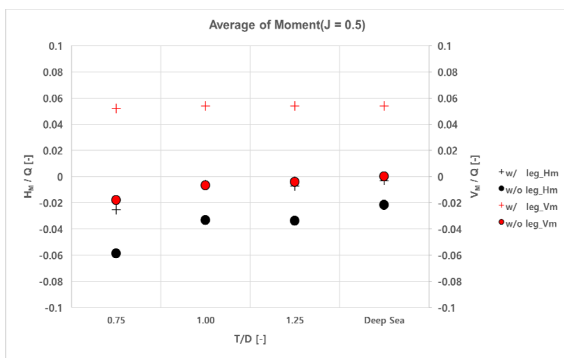


Fig. 11 Vertical and horizontal moments on a propeller

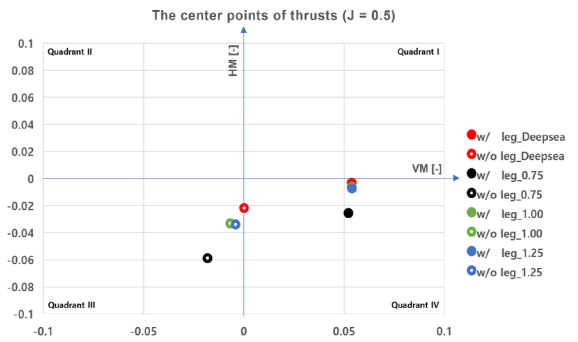


Fig. 12 The comparison of the location of the propeller thrust by the leg consideration and immersion ratio

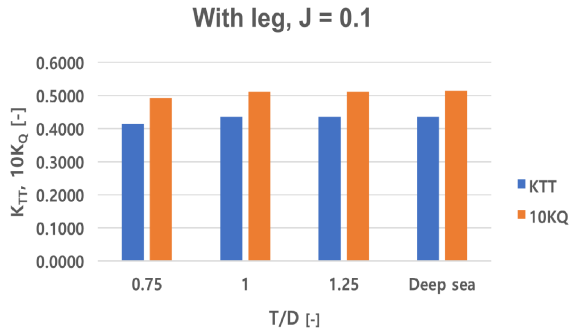
프로펠러의 중심축이 자유수면에 가까워질수록 이 값들간의 차이가 커지는 경향을 보인다. 이에 비해 수평 모멘트(H_M)의 경우 다리구조물 유/무에 상관없이 침수깊이비가 변화함에 따라 변화하는 양이 유사함을 알 수 있다.

Fig. 12에는 X축은 무차원 수직 모멘트(V_M), Y축은 무차원 수평 모멘트(H_M)로 정의하며 프로펠러에 가해지는 힘의 중심점이 어디에 위치하는지 도시하였다. 추력의 중심점 분포는 다리구조물의 유무에 따라 매우 명확히 구분됨을 확인할 수 있었다. 즉, 다리구조물이 고려되지 않은 축대칭인 형상인 N4 형상일 경우 프로펠러 추력의 중심점이 3 사분면에, 다리구조물이 있는 N3 형상에서는 4 사분면에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이는 프로펠러 후방에서 바라볼 때, 다리구조물에 의해 프로펠러의 중심이 우측으로 이동함을 의미한다. 또한, 침수깊이비가 증가할수록, 힘의 중심이 이동하는 거리는 감소한다. 즉, 자유수면에 의해서 모멘트가 발생되며 프로펠러에 편심력 위치가 상대적으로 크게 변화함을 알 수 있었다.

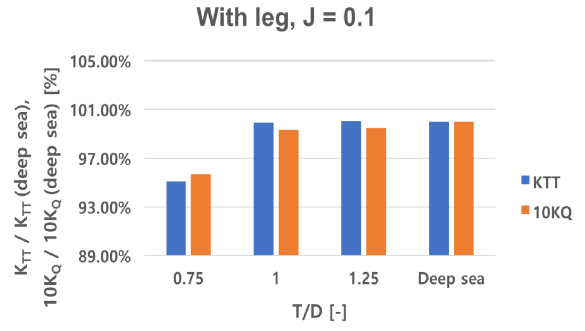
4.4 전진비의 변화에 따른 비교

본 절에서는 전진비 변화에 따른 N3, N4 형상의 변화 시 성능 지표가 어떻게 달라지는지 침수깊이비 별로 비교, 분석하였다. Fig. 13의 X축은 침수깊이비, Y축은 유체역학적인 성능을 나타낸 그래프이다. 이때, Fig. 13(a)와 (b)는 다리구조물을 가진 N3 형상에 대한 성능이며 Fig. 13(c)와 (d)는 축대칭인 N4 형상에 관한 결과를 도시하였다. Fig. 13(a)와 (c)를 비교한 결과, 전진비 0.1에서 다리구조물에 의해 전추력계수 및 토크계수는 미소하게 증가하였다. 또한, 각 형상에 대해 T/D = 0.75인 경우를 제외하고 침수깊이비에 따른 수치는 유사하였다. 그리고 Fig. 13(b)와 (d)를 비교한 결과, 전진비 0.5에서 다리구조물의 영향을 확인할 수 있으며 유체역학적인 성능은 크게 변화하지 않은 것으로 보인다. 그리고 형상별 침수깊이비에 따른 수치는 비슷하였다. Fig. 14에는 충분히 잠긴 상태(deep sea)의 성능 수치를 기준으로 각 침수깊이비별 무차원화된 성능 변화를 도시하였다.

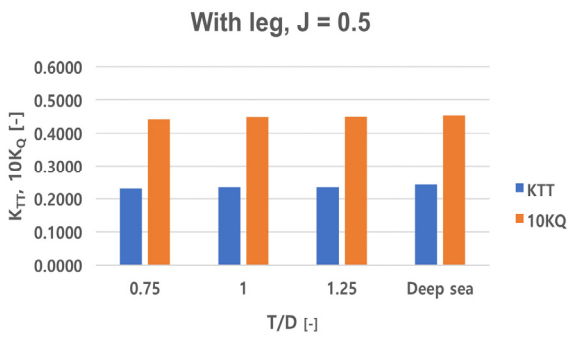
다리구조물의 유/무에 상관없이 T/D = 0.75에서 추력이 크게 감소하였으며 이는 자유수면에 가까웠기 때문으로 생각된다.



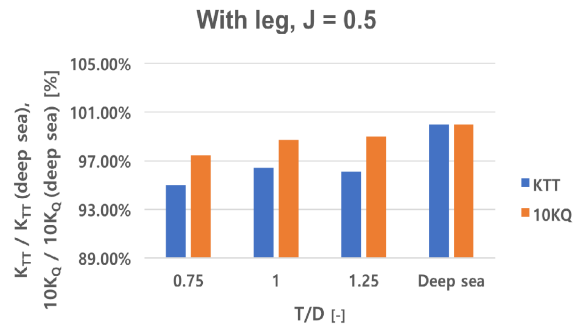
(a) Simulation with leg in J = 0.1



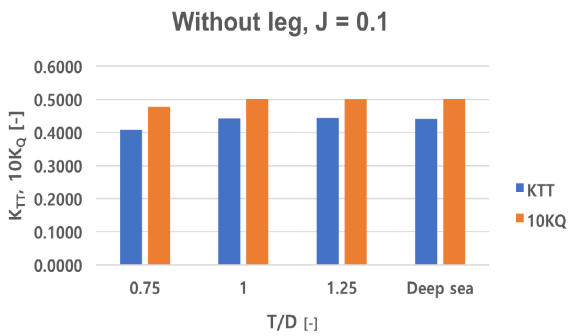
(a) Simulation with leg in J = 0.1



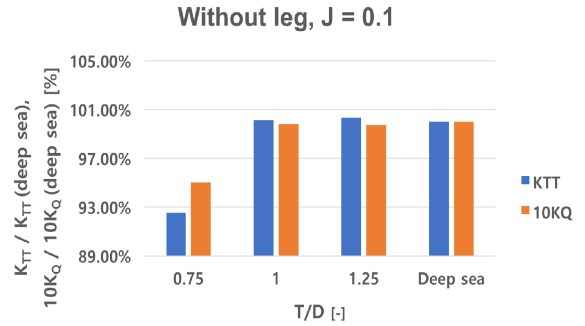
(b) Simulation with leg in J = 0.5



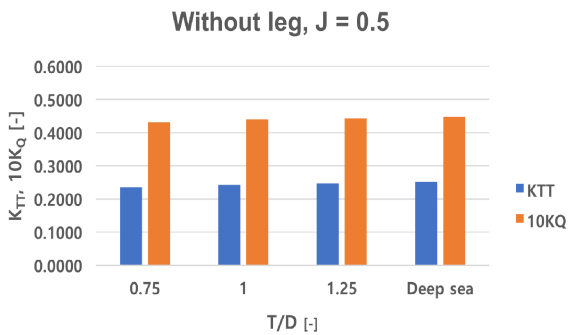
(b) Simulation with leg in J = 0.5



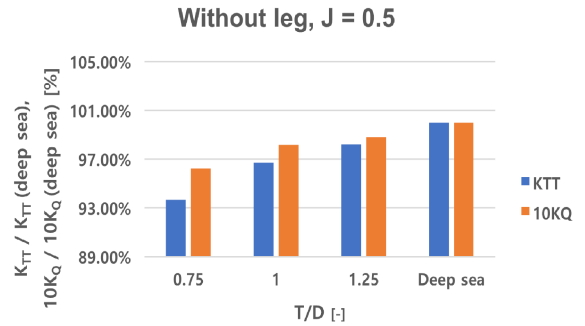
(c) Simulation without leg in J = 0.1



(c) Simulation without leg in J = 0.1



(d) Simulation without leg in J = 0.5



(d) Simulation without leg in J = 0.5

Fig. 13 Hydrodynamic performance by the leg consideration

Fig. 14 The normalized hydrodynamic performance by the leg consideration

특히, 전진비가 0.1인 경우에는 침수 깊이비가 0.75인 조건을 제외하고 다리구조물의 유무에 상관없이 전추력계수 및 토크계수가 충분히 잠긴 상태(deep sea)와 유사한 수준임을 확인하였다. 반면 전진비가 0.5인 경우에는 다리구조물의 유/무에 따라 침수깊이비 변화에 따른 전추력계수 및 토크계수의 변화 추세가 차이를 보였다. 즉, 다리구조물이 있는 경우에는 침수깊이비가 0.75, 1, 1.25일 때 전추력계수가 유사한 수준인 반면, 다리구조물이 없는 경우에는 침수깊이비가 증가할수록 전추력계수도 비례해서 증가하는 경향임을 확인할 수 있다. 이는 전진비가 높은 경우, 다리구조물로 인해 교란되는 자유수면의 영향도가 있음을 간접적으로 의미하고 있다.

4.5 다리 구조물 유/무에 따른 자유수면의 비교

본 절에서는 전진비(J)가 0.5일 때, 다리구조물에 의한 자유수면의 변화를 침수깊이비 별로 비교하였다. 이에 따라, Fig. 15와 같이 추진기의 후류방향으로 0.5D 떨어진 위치에서 두 가지 방향인 흐름방향(streamwise), 횡방향(spanwise)으로 구분지어 파의 높낮이를 비교하였다.

Fig. 16에는 X축을 계산 영역의 폭 방향(spanwise) 혹은 길이 방향(streamwise) 거리를 직경으로, Y축은 자유수면의 높낮이 변화를 추진기의 직경으로 무차원화하여 도시하였다.

Fig. 16(a)와 (c)는 다리구조물을 가진 N3 형상, Fig. 16(b)와 (d)는 축대칭 N4 형상을 대상으로 산출된 결과이다. Fig. 16의 (a)와 (b)를 비교한 결과 침수 깊이비가 깊어질수록 중심선에서 잠기는 정도가 줄어드는 경향은 동일하지만 그 정도와 형태는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 다리구조물이 없는 경우에는 침수 깊이비에 상관없이 좌우 대칭의 형태가 보이는 반면, 다리구조물이 있으면 침수깊이비가 0.75인 경우에는 좌우 비대칭적인 형태를 보였다. 조금 더 큰 침수깊이비에서는 좌우 대칭의 형태가 예측되었다. Fig. 16(c)와 (d)를 비교한 결과, 다리구조물 유/무에 따라 섭동의 형태가 다름을 확인할 수 있었다. 다리구조물이 있는 경우에는 다리구조물을 타고 자유수면이 상승하는 파형상승(wave-run up) 현상이 관찰되고, 다리구조물의 직후방에서는 자유수면이 급격히 상승하여 섭동하는 형태를 보인다. 침수깊이비가 작을수록 섭동하는 자유수면의 높낮이 변화가 커짐을 확인하였다. 다리구조물이 없는 경우에는 흐름방향의 자유수면은

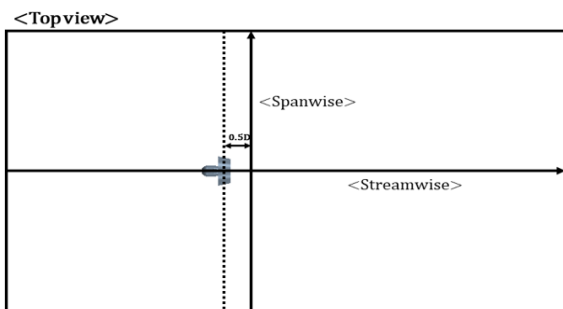
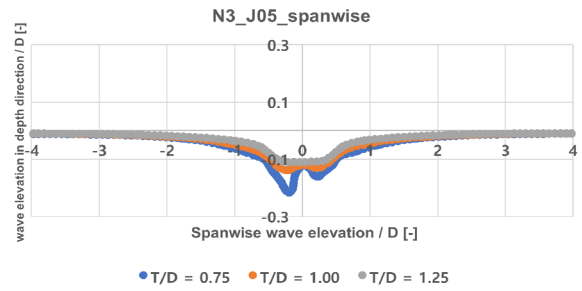
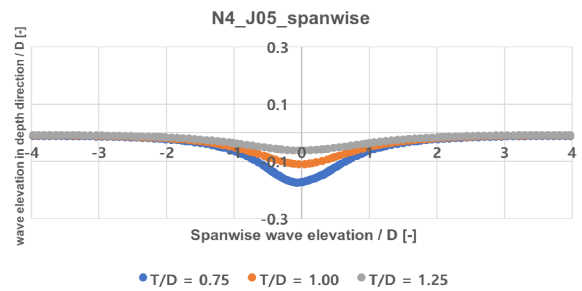


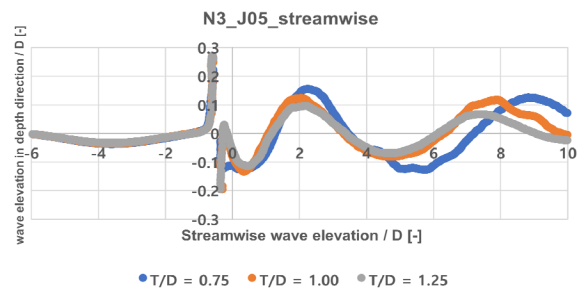
Fig. 15 The directions of wave elevation



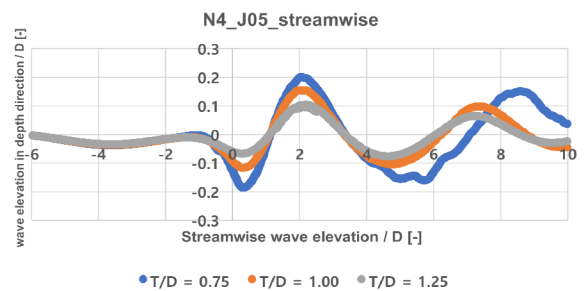
(a) Spanwise direction with leg



(b) Spanwise direction without leg



(c) Streamwise direction with leg



(d) Streamwise direction without leg

Fig. 16 The variation of free surface by leg consideration

모든 침수깊이비에서 유사한 패턴을 보였고 특히, 4D 이내의 범위에서 자유수면의 파저 및 파정 위치가 침수깊이비에 상관없이 동일함을 보였다. 그리고 파저와 파정 간의 높낮이 변화량은 침수깊이비가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다.

추가적으로 Fig. 17에는 다리구조물이 존재하는 경우, 전진비 0.1에서의 자유수면 형태를 도시하였다. 전진비 0.1인 경우에는 전진비 0.5인 경우에 대비, 침수깊이비에 따른 차이가 전체적

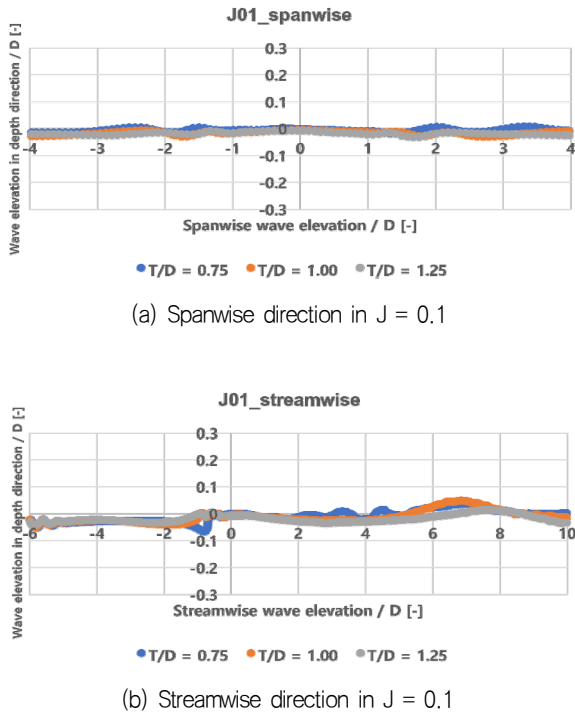


Fig. 17 The variation of free surface relative at J=0.1

으로 적었음을 알 수 있다. 즉, 침수깊이비의 변화에 상관없이 폭방향 및 흐름방향으로의 자유수면 섭동 폭은 Fig. 16(a) 및 (c) 대비 작았다. 하지만 Fig. 17(a)에서와 같이 폭방향으로 섭동을 하는 범위는 오히려 넓어짐을 확인하였다. 또한 흐름방향으로도 다리구조물의 영향도는 거의 보이지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 아지무스 스러스터를 대상으로 수치해석적인 방법을 활용하여 형상변화 및 침수깊이비에 따른 성능 및 자유수면의 형태, 추진기의 편심력 등에 대하여 고찰하였다. 즉, 축대칭 형상여부가 결정되는 아지무스 스러스터 다리구조물의 유/무를 형상변화의 조건으로 고려하였다. 그리고 전진비 변화에 따른 성능 변화 및 자유수면의 형태 등을 비교하였다. 이를 바탕으로 다음과 같이 몇가지 결론을 도출할 수 있었다.

- 전진비가 0.5일 때 다리구조물에 의해 아지무스 스러스터의 상부로 들어오는 유속이 느려져 전체 추력계수가 증가하고 추력의 중심점도 변화하게 된다. 즉, 프로펠러는 양의 수직 모멘트(V_M)가 발생하고 다시말해 추력의 중심점이 중심에서 한쪽으로 편향됨을 의미한다.
- 전진비가 0.5일 때 다리구조물 유무에 따라 아지무스 스러스터 내부 프로펠러의 추력중심이 달라지는데, 침수깊이비도 영향을 미친다. 즉, 수직 모멘트(V_M)와 수평 모멘트(H_M)의 변화량이 침수깊이비에 따라 달라지며 침수깊이비가 작을수록, 다시말해 프로펠러가 자유수면과 가까울수록 그 변

화폭이 큼을 알 수 있다.

- 전진비가 낮은 경우($J=0.1$)와 높은 경우 ($J=0.5$)일 때, 다리구조물의 유무에 따른 성능지표의 변화폭이 침수깊이비에 따라 차이를 보였는데, 전진비가 낮은 경우에는 침수깊이비가 0.75인 경우를 제외하고는 깊은 수심조건과 유사한 크기의 전추력계수 및 토크계수가 예측되었다. 반면 전진비가 높은 경우에는 침수깊이비 별 전추력계수 및 토크계수는 침수깊이비가 증가함에 따라 점차 깊은 수심조건의 값과 유사한 수준까지 전반적으로 증가하는 형태가 예측되었다.
- 전진비가 높은 경우, 아지무스 스러스터 전/후방의 자유수면 형태는 다리구조물의 존재여부에 따라 차이가 큼을 확인하였다. 이에 반해 전진비가 낮은 경우, 다리구조물이 있더라도 자유수면의 교란이 높은 전진비 조건 대비 현저히 줄었음을 알 수 있었다. 이로부터 아지무스 전/후방의 자유수면 형태는 프로펠러의 후류보다는 전진비의 영향이 지배적임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 조선해양산업기술개발사업인 “인공지능 기반의 일원화된 선박의 선형, 구획, 기본계산, 적하 지침 설계시스템 기술 개발[20018667]” 과제의 일부로 수행되었음을 밝혀드립니다.

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2023RIS-007)

Nomenclature

η_o	Propeller Efficiency	δ_{RE}	Corrected Error
C	Correction Factor	K_Q	Propeller Torque Coefficient
CFD	Computational Fluid Dynamics	MRF	Moving Reference Frame
DP	Dynamic Positioning	POW	Propeller Open Water
FPSO	Floating Production Storage Offloading	P_G	Order of Accuracy
H_M	Horizontal Moment of Propeller	R_G	Convergence Ratio
ITTC	International Towing Tank Conference	U_G	Grid Uncertainty
K_{TT}	Total Thrust Coefficient	VOF	Volume Of Fluid
K_{TP}	Propeller Thrust Coefficient	V_M	Vertical Moment of Propeller
K_{TD}	Duct Thrust Coefficient	WTIV	Wind Turbine Installation Vessel
K_{Drag}	Drag Coefficient		

References

- Bulten, N.W.H., 2006. Numerical analysis of flow around a thruster. *Dynamic Positioning Conference*, Netherlands.
- Bulten, N. and Stoltenkamp, P., 2016. Improved DP-capability with tilted thruster units and smart controls algorithms. *Dynamic Positioning Conference*, Houston, USA.
- Dang, J. and Laheij, H., 2004. Hydrodynamic aspects of steerable thrusters. *Dynamic Positioning Conference*, Druenen, Netherlands.
- Funeno, I., 2009. Hydrodynamics optimal design of ducted azimuth thrusters. *SMP'09*, Trondheim, Norway.
- ITTC – Quality Manual 7.5–03–01–01, 2008. Uncertainty analysis in CFD verification and validation methodology and procedures. ITTC Recommended Procedures and Guidelines.
- ITTC – Quality Manual 7.5–02–03–02.1, 2014. Open water test. ITTC Recommended Procedures and Guidelines.
- Lehn, E., 1980. Thruster interaction effects. *The Ship Reserch Institute of Norway*, Trondheim, Norway.
- Ottens, H., Dijk, R.V. and Meskers, G., 2011. Benchmark study on thruster hull interaction on a semi submersible crane vessel. *OMAE2011–49433*, Rotterdam, Netherlands.
- Palm, M., Jurgens, D. and Bendl, D., 2011. Numerical and experimental study on ventilation for azimuth thrusters and cycloidal propellers. *SMP'11*, Hamburg, Germany.
- Seo, S.U., Song, S.J. and Park, S.H., 2016. A study on CFD uncertainty analysis and its application to ship resistance performance using open source libraries, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.329–335.
- Song, G.S., Kim, H.J., Park, H.G. and Seo, J.S., 2013. The investigation for interaction phenomenon of azimuth thruster on ship. *CECO*, Changwon, Korea.
- Song, G.S. and Lee, S.W., 2022. A study of free surface influence on the ducted propeller using CFD. *Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Changwon, Republic of Korea, pp.54–62.



서영수



송지수