



CFD와 MMG 모델을 이용한 로터세일 선박의 직진성능 및 중립타각 분석

변병진·양경규[†]
충남대학교 자율운항시스템공학과

Analysis of Directional Stability and Neutral Rudder Angle using CFD and MMG Model

Byung-Jin Byun·Kyung-Kyu Yang[†]
Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University

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 growing interest in eco-friendly ships driven by zero-carbon emission regulations has led to increased attention toward wind-assisted propulsion systems. Among these technologies, the rotor sail utilizes the Magnus effect to generate auxiliary thrust. However, rotor sails induce constant drift forces and yaw moments, necessitating the control of both rudder angles and the rotation speeds of the rotor sail to maintain a stable course. This study investigates the directional stability characteristics of a rotor-sail ship under varying wind directions. The external forces generated by the rotor sail were modeled and then integrated into maneuvering modeling group(MMG) model. The model was validated through comparisons with results obtained from computational fluid dynamics(CFD) simulations. To satisfy self-propulsion conditions, a virtual disk approach was employed, and the same PID gain values were applied to the rudder control for each simulation method. The study first examined the convergence speed during straight-line motion, where only the surge motion was free, and then extended the analysis to evaluate directional stability in the horizontal plane with three degrees-of-freedom(DOF). The neutral rudder angles and convergence speeds under various wind directions were compared for each simulation model. The findings of this study suggest that the MMG model can serve as an effective pre-screening tool for maneuvering simulations of rotor-sail ships, thereby reducing the computational resources required for CFD-based analysis.

Keywords : Wind-assisted propulsion(풍력보조추진), Rotor sail(로터세일), Directional stability(직진성능), MMG model(MMG 모델), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

전 세계적인 탄소 배출 감축 노력에 대응하여 국제해사기구(international maritime organization, IMO)는 2008년 대비 2030년까지 40%, 2050년까지 70%의 국제 해운 온실가스 배출 감축이라는 목표를 제시하였다. 이에 따라 조선 해운 산업 전반에서 친환경 기술 도입이 필수 과제가 되었다. 다양한 탈탄소화 대안 중 풍력 보조 추진 시스템(wind-assisted propulsion system, WAPS)은 지속가능성, 낮은 환경 영향, 기존 선박에 비교적 쉬운 개조 가능성 때문에 주목을 받고 있다.

WAPS 중 로터세일은 회전하는 원통 구조에서 발생하는 마그

누스 효과(Magnus effect)를 이용해 선박 추진을 보조하는 공기역학적 양력을 생성한다. 로터세일은 연료 소비를 효과적으로 줄일 수 있지만, 비스듬한 풍향 조건에서는 좌우방향 표류력과 선수동요 모멘트를 유발한다. 따라서 직진성을 유지하려면 타각의 제어가 필요하다.

회전 원통의 공기역학 특성을 규명하기 위해 다수의 실험 및 수치해석 연구가 수행됐다. Marco et al. (2016)은 URANS 솔버를 이용한 로터세일의 성능 평가를 수행하였으며, 로터세일 외력을 신속하게 추정하기 위한 대리모델(surrogate model)을 제안하였다. Garenaux et al. (2020)은 다양한 레이놀즈수 조건에서 양력 및 항력 계수를 평가하기 위한 풍동 실험을 수행하였

다. Kwon et al. (2022)은 CFD를 이용한 로터세일의 단독 성능 예측과 경계조건, 난류모델 등의 여러 변수가 미치는 영향을 조사하여 수치해석을 이용한 로터세일 예측 방법을 확립하였다. Park et al. (2024)은 소형 선박용 비대칭 수직 접이식 로터 세일(AFRS)을 제안하고, 전산유체역학을 통해 공력 성능을 기존 로터 세일과 비교하였다. Woo and Song (2025)은 로터세일의 공력 성능을 수치해석으로 평가하고, 텔레스코픽 및 볼록, 오목 형상 등 8가지 신규 설계를 제안하여 성능을 비교하였다. Hwang (2024)은 로터세일 형상과 로터 높이에 따른 양력 변화를 반영하기 위한 양력 모델을 개발하여 모델링의 정확도를 개선했다.

로터세일의 성능 평가 이외에도 해상 상태와 운용 전략을 포함한 시스템 관점에서 연구 또한 활발히 수행되고 있다. Copuroglu et al. (2018)은 횡파(beam waves) 조건에서 횡동요 운동이 로터 세일 유효 양력과 추진 보조 효과를 감소시킬 수 있음을 보여 주었고, Tillig and Ringsberg (2020)은 설계 운영 해석을 통합한 프레임워크를 제시하여 로터세일 선박의 장비 배치 및 운항 전략을 정량화했다. Sauder and Alterskjaer (2022)은 사이버-피지컬(cyber-physical) 시험법으로 모형선과 가상 제어 추진 시스템을 실시간 연동해, 로터세일 선박의 페루프 성능을 현실적으로 평가하는 방법을 제안했다. Guzelbulut et al. (2024)은 모델 기반 설계 접근으로 풍력 보조 시스템의 에너지 절감 효과를 운항 조건에 따라 정량적으로 평가했다.

한편, 선박 조종성능 해석 분야에서는 CFD를 활용한 직접 수치해석 연구가 활발히 수행되고 있다. Wang and Wan (2018)은 ONRT 모형선에 대해 파랑 중 자항 및 지그재그 시험을 수치적으로 재현하였다. Kim et al. (2021)은 자유항주 CFD 기법을 적용하여 파랑중 선박 조종 성능의 주요 지표에 대한 격자 및 시간 불확실성 분석을 체계적으로 수행하였다. Lee and Yang (2025)은 CFD를 이용하여 수중운동체의 타 형상에 따른 조종 성능을 분석하는 등 국내외에서 CFD를 활용한 조종성능 직접 해석 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 로터세일 장착 선박의 조종성능을 직접 수치해석으로 평가한 연구는 제한적이며, 로터세일 외력을 maneuvering modeling group (MMG, Yasukawa and Yoshimura, 2015) 모델에 통합하여 직진 안정성 지표를 CFD 해석과 정량적으로 비교 검증한 사례는 찾아보기 어렵다.

본 연구는 로터세일 장착 선박의 조종 성능 중 직진 성능을 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하고, 로터세일 외력항을 입력한 MMG 모델의 해석 결과를 CFD 결과와 비교함으로써 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 CFD 해석 결과를 통해 얻은 유입풍을 모델링하고, 이를 적용한 로터세일 외력을 MMG 모델에 통합하여 1자유도 조건에서 수평 속도 및 추진력, 횡력(side force)을 평가하였다. 그리고 수평면 3자유도 조건으로 확장하여 로터세일이 유발하는 선수동요 모멘트를 상쇄하기 위한 중립 타각과 궤적을 CFD 결과와 비교하였다.

Table 1 Principal particulars of full-scale and model ship

	Full-scale	Model
Scale ratio	1	1/100
L_{pp} (Length between perpendiculars) [m]	320	3.20
B (Breadth) [m]	58	0.58
d (Draft) [m]	20.8	0.208
∇ (Displacement) [m ³]	312622	0.313
A_R (Rudder lateral area) [m ²]	136.7	0.0137
Rudder turn rate [deg/s]	2.34	23.4
D_P (Propeller diameter) [m]	9.86	0.0986

Table 2 Specification of rotor sail

	Experiment	Present
Scale ratio	1	1/33
H (Height) [m]	18.0	0.545
D (Diameter) [m]	3.00	0.091
AR (Aspect Ratio)	6.00	
DR (Disk Ratio)	1.89	
SR (Spin Ratio)	3.00	
U_∞ [m/s]	0.14	2.00
Re (Reynolds number)	2.75×10^4	1.17×10^4

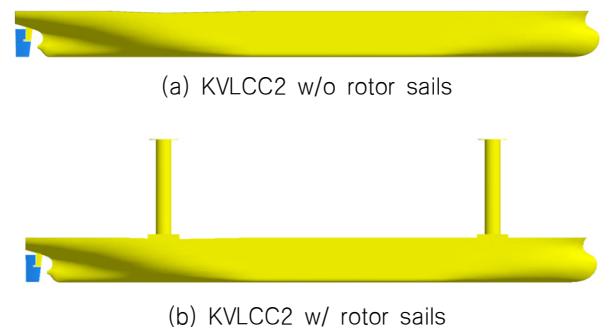


Fig. 1 Target model

2. 해석 대상 및 해석 방법

2.1 해석 대상

본 연구에서는 KVLCC2 선형의 1/100 축척 모형을 대상 선박으로 사용하였다. 방향타(rudder)는 혼(horn)타의 형상이며, 로터세일은 Garenaux et al. (2020)의 실험에서 사용된 풍동 모형을 1/33로 축소하여 적용하였다. 선박과 로터세일의 제원은 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다. 로터세일은 Fig. 1과 같이 선박의 무게중심 x_G 로부터 종 방향으로 $\pm 0.3L_{pp}$ 위치에 설치하였다. 회전비(spin ratio)는 3.0으로 고정하였으며, 평면도 기준 로터세일 모두 반시계 방향으로 회전한다.

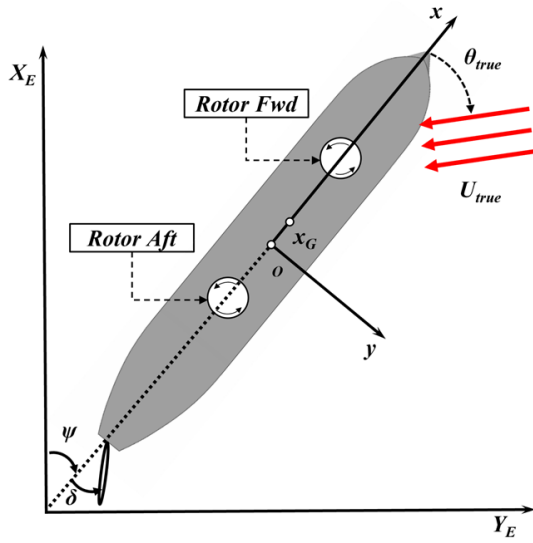


Fig. 2 Coordinate system of a rotor-sail ship

2.2 로터세일 외력이 적용된 MMG 모델

본 연구에서는 Yasukawa and Yoshimura (2015)가 제안한 MMG 모델을 사용하여 로터세일 선박의 3자유도 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2와 같이 물체고정좌표계의 원점 o 는 선체 중앙에 위치하며, 선수 방향을 양의 x 축, 우현 방향을 양의 y 축으로 정의하였다. 하첨자 E 는 지구좌표계 기준값을 나타내며, 초기 선박이 직진하는 상황에서 x 축과 X_E 축은 일치한다. 선수각 ψ 는 X_E 축과 x 축 사이 각도로 정의하고, 우현 방향 회전을 양의 방향으로 한다. 타각 δ 는 방향타 기준 선체 중심선 대비 각도로 정의하며 우현 편향을 양의 방향으로 한다. 실제 풍향 θ_{true} 는 선수를 기준으로 측정하며, 선수풍(head wind)일 때를 0° 로 정의하고 시계 방향으로 증가한다.

본 연구에서는 전후동요 및 좌우동요, 선수동요 운동을 고려하며 아래의 운동방정식을 계산하였다.

$$\begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v_m r - x_G m r^2 &= X \\ (m + m_y)\dot{v}_m + (m + m_x)ur + x_G m \dot{r} &= Y \\ (I_{z_G} + x_G^2 m + J_z)\dot{r} + x_G m(\dot{v}_m + ur) &= N_m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 m_x 와 m_y 는 전후동요 및 좌우동요에 대한 부가질량(added mass)을 의미하며, J_z 는 선수동요에 대한 부가 관성 모멘트(added yaw moment of inertia)를 뜻한다. 하첨자 m 은 선체 중앙에서 정의되었음을 나타낸다. 외력항은 아래식과 같이 선체(H) 및 프로펠러(P), 방향타(R), 두 개의 로터세일(Rotor1, Rotor2)의 항들로 구성된다.

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_{Rotor1} + X_{Rotor2} \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_{Rotor1} + Y_{Rotor2} \\ N_m &= N_H + N_R + N_{Rotor1} + N_{Rotor2} \\ N_{Rotor1} &= Y_{Rotor1} \times (x_G - 0.3L_{pp}) \\ N_{Rotor2} &= Y_{Rotor2} \times (x_G + 0.3L_{pp}) \end{aligned} \quad (2)$$

로터세일에 의한 외력은 Sauder and Alterskjaer (2022)의 방법을 참고하여 준정상(quasi-steady) 접근법과 스트립 이론(strip theory)을 이용하여 계산하였다. 아래 식과 같이 먼저 θ_{true} 에 따라 구한 실제 유입풍(true wind) 속도 U_{true} 에서 선박의 속도 U_{ship} 을 뺀 값으로 겉보기 유입풍(apparent wind) 속도 U_A 를 계산한다.

$$\vec{U}_{true}(z) = U_{true}(z) \begin{bmatrix} \cos(\theta_{true}) \\ \sin(\theta_{true}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{U}_A(z) = \vec{U}_{true}(z) - \vec{U}_{ship} \quad (4)$$

로터세일의 각 높이에서 유입풍의 세기가 차이가 나기 때문에 기준 풍속 U_∞ 에 비균일 유입풍 모델을 곱하여 각 높이에서의 실제 유입풍 속도를 산정하였다. 겉보기 유입풍 속력 U_A 의 제곱을 z 방향으로 적분하여 겉보기 유입풍 속도 방향에 수직인 성분인 양력과 평행한 성분인 항력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho D C_L \int_0^H U_A^2 dz \quad (5)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho D C_D \int_0^H U_A^2 dz$$

여기서 Hwang (2024)의 대리모델을 이용하여 양력계수 C_L 과 항력계수 C_D 를 다음과 같이 산정하였다.

$$\begin{aligned} C_L &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 a_{ijk} S R^i A R^j D R^k \\ C_D &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 b_{ijk} S R^i A R^j D R^k \end{aligned} \quad (6)$$

이 대리모델은 Marco et al. (2016)의 모델을 참고한 모델로 로터세일의 작동 조건을 고려하여 $2 \leq SR \leq 4$, $4 \leq AR \leq 7$, $1.5 \leq DR \leq 2.5$ 의 범위에서 CFD 단독성능 해석을 수행하고 이를 최소 자승법을 이용하여 다항식 형태로 모델링하였다.

양력과 항력을 겉보기 풍향 θ_A 을 이용하여 다음과 같이 로터세일에 의한 추력 성분 X_{Rotor} 와 횡력 성분 Y_{Rotor} 를 계산하였다.

$$\begin{aligned} X_{Rotor} &= -F_D \cos(\theta_A) + F_L \sin(\theta_A) \\ Y_{Rotor} &= -F_D \sin(\theta_A) - F_L \cos(\theta_A) \end{aligned} \quad (7)$$

유입풍 모델링을 위해 Rotor Fwd 주위에서 실제 풍속 U_{true} 를 CFD 해석 결과로부터 측정하였다. 측정 방향은 Fig. 3과 같이 θ_{true} 와 같은 방향에서 0° 부터 180° 까지 30° 간격으로 설정하였고, 측정 거리는 Rotor Fwd의 중심으로부터 1.5D부터 4.0D까지 0.5D 간격으로 측정한 유입풍을 비교하였다.

Fig. 4에 비교한 바와 같이 1.5D 위치에서는 로터세일의 회전 운동으로 인해 유입풍속이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 0.5D 간격으로 반경 방향으로 넓혀가며 유입풍속을 확인한 결과, 3.5D에서의 U_{true} 가 4.0D의 유입풍속과 거의 일치하는 것을 확인하였

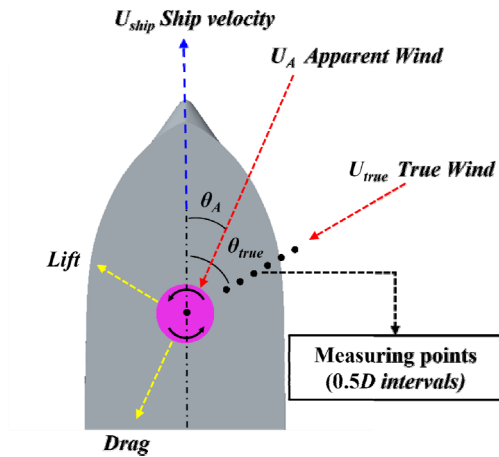


Fig. 3 Measuring position of true wind speed

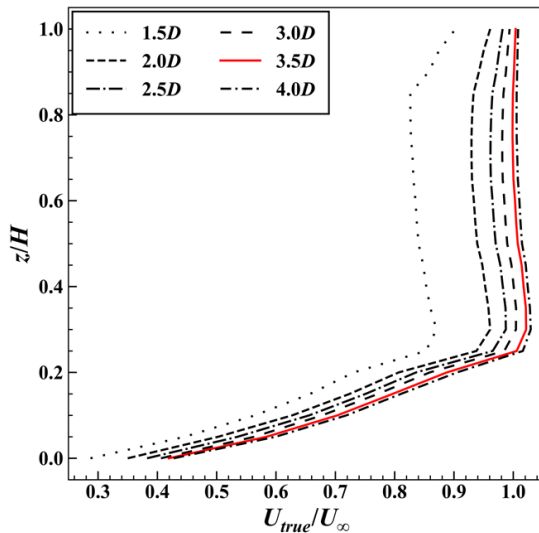
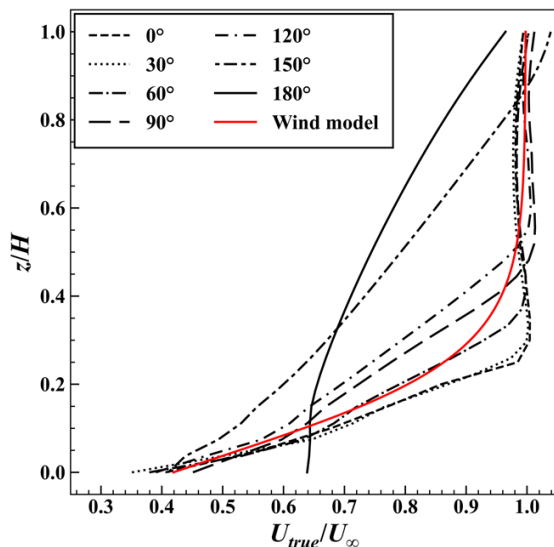

 Fig. 4 Comparison of wind speed about measurement location ($\theta_{true} = 0^\circ$)


Fig. 5 Logistic regression model of inflow wind speed

Table 3 Parameters of logistic regression model

Parameter	Value
a	0.995
β	17.10
z_0	0.020

다. 이는 로터세일의 회전유동에 영향을 받지 않는 거리로 판단 되어 3.5D에서 측정한 유입풍속 U_{true} 를 유입풍 모델링에 사용하였다.

각 풍향에 따라 유입풍의 z방향 프로파일을 Fig. 5에 비교하였다. $\theta_{true} = 150^\circ$ 와 $\theta_{true} = 180^\circ$ 의 경우, 상갑판과의 상호간섭이 다른 풍향에 비해 높아 유입풍속 모델링에서 제외하였다.

이후 $\theta_{true} = 0^\circ$ 부터 $\theta_{true} = 120^\circ$ 까지 30° 간격으로 Fwd Rotor의 3.5D 위치에서 측정한 유입풍속을 사용하여 로지스틱 회귀를 통해 아래 식의 매개변수를 도출하였다. 본 연구에서 사용한 유입풍 모델(Wind model)의 매개변수는 Table 3에 정리하였다.

$$U_{true}(z) = \frac{\alpha U_\infty}{1 + e^{[-\beta + (z - z_0)]}} \quad (8)$$

2.3 CFD 해석 설정

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+(v23.06)을 사용하여 비압축성 유동에 대한 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 수행하였다. 자유수면은 volume-of-fluid (VOF) 방법으로 포착하고, 선체의 강체 운동은 중첩 격자 기법으로, 로터세일의 회전 효과는 moving reference frame (MRF) 기법으로 모델링하였다. 일반적인 MRF 기법에서는 비관성좌표계 도입에 따른 가속도를 지배방정식의 외력항으로 처리하므로 별도의 MRF 영역 설정이 요구된다. 반면 로터세일과 같은 원통형 형상은 로터세일 실린더와 톱 디스크 벽면에 회전속도 경계조건(rotating wall boundary condition)을 부여함으로써 비교적 간단하게 회전하는 물체의 모사가 가능하다.

프로펠러의 추력은 계산 효율을 위해 가상 디스크(virtual disk) 방법 중 체적력 프로펠러(body force propeller) 모델을 적용하였다. 체적력 모델은 프로펠러 블레이드의 기하학적 형상을 격자로 구현하지 않고 추력 및 토크를 체적력 소스항으로 운동량 방정식에 직접 추가하는 방식이다(Hough and Ordway, 1964). 반경방향 부하 분포에는 Goldstein optimum 함수를 적용하였으며(Goldstein, 1929), 이를 통해 슬립스트림 내 선회류(swirl) 성분이 시간 평균적으로 모사된다. 가상 디스크 방식은 평균적인 유동 특성만을 고려하기 때문에 방향타 유입류의 비대칭 압력 분포가 간접적으로 반영된다. 난류모델은 realizable $k-\epsilon$ 를 적용하고 벽함수로 two layer all y+를 사용하였다. 격자는 trimmer 격자를 사용하였으며 격자 수렴도 해석

시 모든 격자 수준에서 y^+ 는 30~100 범위로 유지하도록 prism layer를 조정하였다. 시간 적분은 암시적 비정상(implicit unsteady) 방법을 적용하였고, 속도와 압력은 SIMPLE 방법을 이용하여 연성하였다.

본 연구에서 적용된 계산영역은 Fig. 6과 같이 선박의 길이(LPP)로 무차원하여 표현하였다. 선수 방향으로 $1.5L_{pp}$, 선미 방향으로 파의 반사를 최소화하기 위해 $2.5L_{pp}$ 로 설정하였고, 폭은 $1.0L_{pp}$, 깊이는 $2.5L_{pp}$ 길이로 설정하였다(ITTC, 2024). 경계조건으로 양측면(side), 입구면(inlet), 출구면(outlet)과 아랫면(bottom)은 속도유입조건(velocity inlet)을 적용하였고, 윗면(top)에는 압력유출조건(pressure outlet)을 적용하였다.

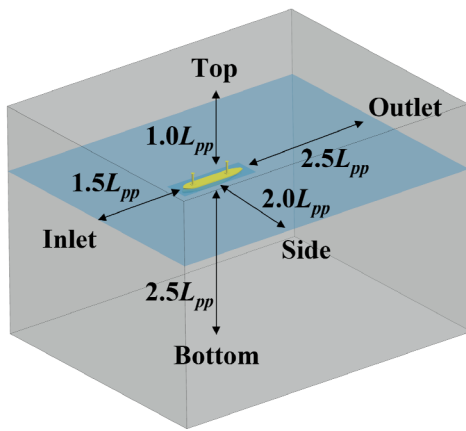


Fig. 6 Computational domain

2.4 방향타 조종

3자유도 시뮬레이션에서 로터세일 외력으로 인한 모멘트를 상쇄하기 위해 방향타에 PI 제어를 적용하였다. MMG 모델을 통해 조정된 PI 계수들을 CFD 계산에 동일하게 사용하였고 제어는 아래 식과 같이 선수각에 대한 제어를 적용하였다.

$$\delta_{target}(t) = K_p e(t) - K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$e(t) = \psi_{target}(t) - \psi(t)$$

여기서 K_p 와 K_I 는 각각 비례 및 적분 이득, ψ_{target} 은 목표 선수각, ψ 는 현재 선수각이다. 오차를 목표 선수각과 현재 선수각의 차이로 두고, 비례-적분(PI) 제어를 적용하여 목표 조타각 $\delta_{target}(t)$ 을 계산하였다. K_p 와 K_I 는 MMG 모델을 활용하여 선수각 응답의 수렴성과 안정성을 기준으로 시행착오법(trial and error)을 통해 $K_p=5.0$, $K_I=0.2$ 로 결정하였다. 실제 조타기 구동계의 물리적 제약을 반영하기 위해 조타각 변화율에 상한을 두었다.

3. 해석 결과

3.1 격자계 및 수렴도 테스트

Fig. 7은 본 연구에서 사용한 격자계를 나타내며, Fig. 7(a)와 같이 선박의 Kelvin wave를 모사하기 위해 선체 주위 격자의 해상도를 높였다. 선체 표면으로부터 반사되는 선체 주변 수면파를 예측하기 위해 Kim et al. (2021)을 참고하여 자유수면 부근의 격자를 해상하였고, 추후 6자유도 선박 조종 운동을 해석하기 위해 선체 중첩격자를 생성하였다. 또한 방향타 회전 움직임을 반영하기 위해 방향타 주변에도 중첩격자를 생성하였다. 배경 격자는 선체의 수평면(Surge, Sway, Yaw) 움직임을 따라가도록 설정하였다.

격자의 수렴성을 확인하고자 KVLCC2 선박의 자향 시험을 ITTC 권고 절차에 따라 수행하였다. 모든 격자 조건에서 프로펠러 회전수는 17.5 rps로 고정된 후 트림(trim) 및 침하(sinkage)를 고려한 상태의 자향 수렴 선속 결과를 이용하여 격자 수렴도를

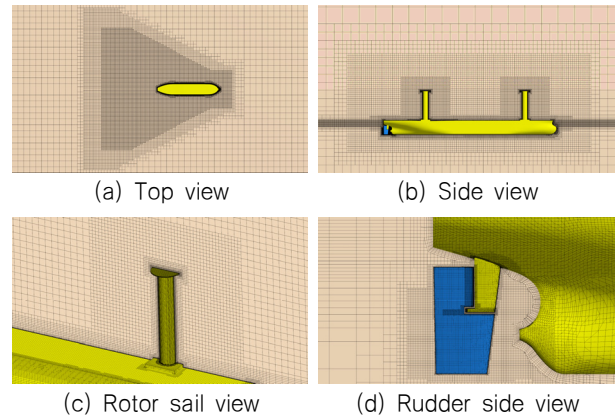


Fig. 7 Grid configuration of rotor sail ship

Table 4 Results of grid dependency test

	Coarse	Medium	Fine
Base size	0.0141	0.0100	0.0071
Cell	1,697,762	3,627,627	8,233,375
r_i	1.414		
$\varepsilon_{i,21}$	0.0100		
$\varepsilon_{i,32}$	0.0330		
R_i	0.3030		
	Monotonic Convergence		
P_i	3.4449		
δ^*_{REi}	0.0043		
$P_{i,est}$	2.0000		
C_i	2.3000		
δ^*_i	0.0100		
U_i	0.0157		
U_{iC}	0.0057		

Table 5 Comparison of self-propulsion point w/o rotor sail

	RPS	Speed (m/s)
Model test	17.5	0.7973
CFD	17.881	0.7979
Error (%)	+2.17	+0.08

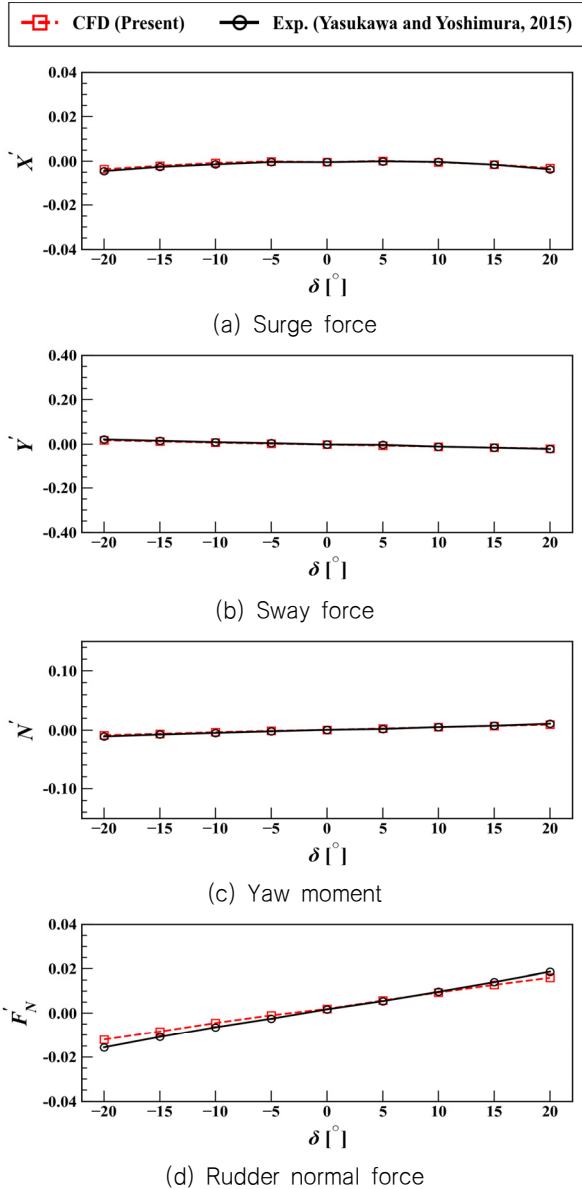


Fig. 8 Comparison of CFD and experimental results for static rudder tests

확인하였다. 격자수와 수렴도 해석결과는 Table 4에 정리하였으며, 격자 불확실성은 1.57%로 사용한 격자의 수렴성을 나타낸다.

계산의 유효성을 확인하기 위해 로터세일이 없는 상태의 선박을 대상으로 Kim et al. (2019) 모형실험 결과와 자항점을 비교하여 Table 5에 정리하였다. Medium 격자를 사용하여 0.5 rps 간격으로 세 가지 프로펠러 회전수 조건에서 수렴 선속을 측정하였고, 수렴 선속 결과를 최소 자승법(least squares method)을

통해 자항점을 도출하였다. 수렴 선속은 약 0.7979 m/s로 모형시험과 약 0.08% 오차를 나타냈고, 자항점의 프로펠러 회전수는 2.17% 오차를 나타냈다.

타력 계산의 정확도를 확인하기 위해 정적 방향타 테스트 (static rudder test)를 수행하고 이를 통해 얻어진 유체력 계수를 Yasukawa and Yoshimura (2015)의 모형시험 결과와 비교하였다. 타각 δ 를 0°에서 20° 범위에서 변화시키며 선체에 작용하는 종방향력 X' 및 횡방향력 Y' , 선수동요 모멘트 N' , 타 수직력 F'_N 을 비교하여 Fig. 8에 정리하였다. 본 연구의 CFD 해석 결과는 모형시험 결과와 우수한 일치를 보인다.

로터세일 단독 성능 테스트를 위해 로터세일 주변 격자의 경우 Hwang (2024)의 설정을 동일하게 구성하였다. 해당 설정에서 양력 및 항력 계수의 격자 불확실성은 각각 1.77%와 0.82%로 나타났으며, 로터세일 단독성능 모형시험 결과(Garenaux et al., 2020)와 양력 및 항력 계수 모두 약 10% 이내의 오차를 보였다.

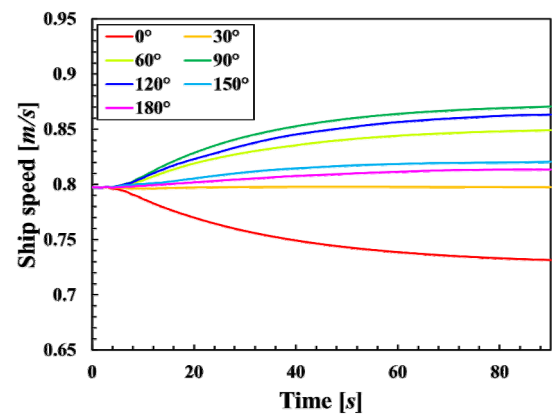
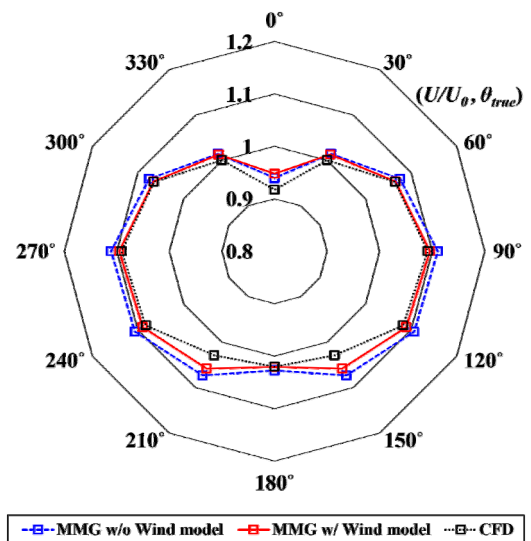


Fig. 9 CFD analysis of rotor-sail ship speed convergence time in a 1DoF simulation


 Fig. 10 Converged speed of rotor sail ship in 1DoF simulation ($t=90s$)

3.2 1자유도 해석

1자유도 CFD 해석을 수행하여 로터세일 추진력이 작용하는 조건에서 MMG모델에 로터세일을 결합한 모델을 검증하였다. $\theta_{true} = 0^\circ$ 부터 $\theta_{true} = 180^\circ$ 까지 30° 간격으로 설정하여 해석하였고, Fig. 9과 같이 로터세일 선박의 선속 수렴 시간인 90초까지 계산을 수행하였다.

모든 θ_{true} 에 대하여 수렴된 선속을 Fig. 10에 나타내었으며, 그래프의 반경 방향, 각도 방향은 각각 로터세일이 장착된 KVLCC2 선박의 수렴 선속과 유입풍향 θ_{true} 을 나타낸다. 수렴 선속은 로터세일이 장착되지 않은 KVLCC2의 자항선속 U_0 로 무차원화 하였으며, $\theta_{true} = 0^\circ$ 부터 $\theta_{true} = 180^\circ$ 까지의 결과를 대칭시킨 그래프이다. 로터세일 높이에 따라 유입풍속을 균일하게 입력한 MMG 모델과 유입풍 모델이 적용된 MMG 모델을 CFD의 결과와 비교하였다.

균일풍을 적용한 MMG 모델은 상갑판과 유입풍의 상호작용에 따른 로터세일 성능 저감 효과를 반영하지 못하므로 전반적으로 선속을 과대 예측하였다. 이에 비해 유입풍 모델을 적용한 경우에는 선박의 상갑판 근처 유속 감소 효과가 반영되어 CFD 결과와의 일치도가 전반적으로 유사하였다.

Fig. 11은 길이방향으로 일렬 배치된 두 개의 로터에서 측정된 결보기 유입풍속 그래프이다. 로터 간 상호작용이 상대적으로 큰 $\theta_{true} = 0^\circ$ 및 $\theta_{true} = 150^\circ$ 에서는 Rotor Fwd와 Rotor Aft에서 측정된 결보기 유입풍속 U_A 차이가 크게 나타났다. 반면, 상호작용이 작은 $\theta_{true} = 90^\circ$ 에서는 두 로터의 U_A 가 거의 일치하였다. 이처럼 두 로터세일의 상호작용으로 인해 유입풍속 개형이 달라질 경우 Fig. 9에서 살펴본 바와 같이 선속의 오차가 커질 수 있다.

특히 정면풍인 $\theta_{true} = 0^\circ$ 에서는 Rotor Fwd가 먼저 유입풍을 받고, 그 후류 및 회전 유동의 영향으로 Rotor Aft의 U_A 가 감소하였다. 반대로 $\theta_{true} = 150^\circ$ 에서는 Rotor Aft의 회전으로 형성된 유동

이 Rotor Fwd 주변 유동에 영향을 미치면서 Rotor Fwd의 U_A 가 증가하는 경향이 나타났다. 즉, $\theta_{true} = 0^\circ$ 와 $\theta_{true} = 150^\circ$ 에서는 로터간 상호작용으로 인해 실제 각 로터의 유입 조건이 Rotor Fwd 기준 유입풍 모델과 달라지므로 CFD와 MMG 모델의 결과 차이가 상대적으로 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 반면 $\theta_{true} = 180^\circ$ 에서는 $\theta_{true} = 0^\circ$ 및 $\theta_{true} = 150^\circ$ 에 비해 두 로터 간 U_A 차이가 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 선박의 전진 방향과 풍향이 서로 일치하기 때문에 로터 간 상호작용이 비교적 작은 것을 의미한다.

3.3 3자유도 해석

앞선 1자유도 해석을 통해 선속이 수렴된 이후 선수각 오차를 기준으로 방향타 제어를 시작하며, 선수각이 0° 로 수렴하는 시간에 대응하는 150초까지 수평면 3자유도 해석을 수행하였다.

기존의 MMG모델은 방향타 유효 유입각 α_R 을 선박 표류각 β 에 대한 식을 이용하여 계산하므로 1자유도 조건에서는 α_R 이 0으로 예측되어 방향타 모멘트가 발생하지 않는다. 하지만 CFD 해석 결과에서 Fig. 12의 $0.5\rho U_0^2$ 로 무차원화된 동압 분포와 같이 프로펠러의 비대칭 후류로 인해 방향타각 $\delta = 0^\circ$ 에서 방향타 모멘트(NR)가 발생한다. 따라서 CFD 결과의 풍향별 평균 방향타 모멘트(NR)를 Yasukawa and Yoshimura (2015)의 모델에 대입하여 식 (10)과 같이 α_R 을 미지수로 정리하였다. 이를 통해 $\alpha_R = 2.0^\circ$ 로

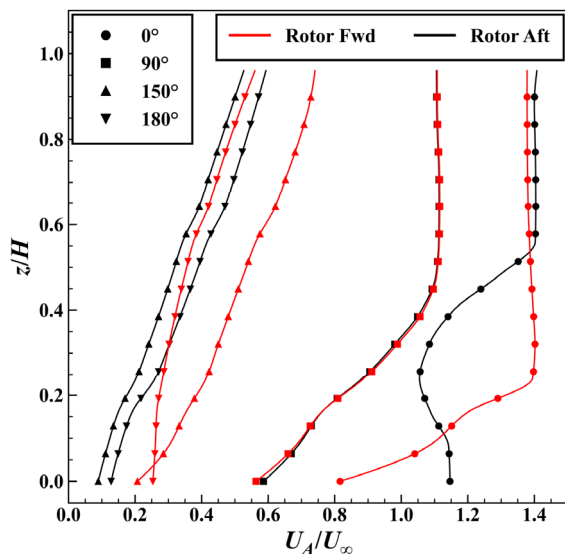
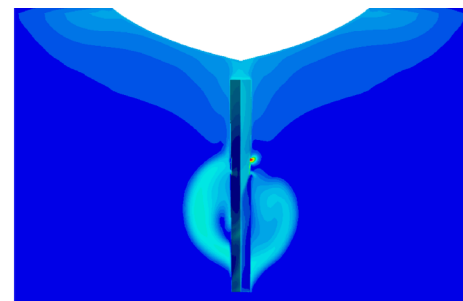
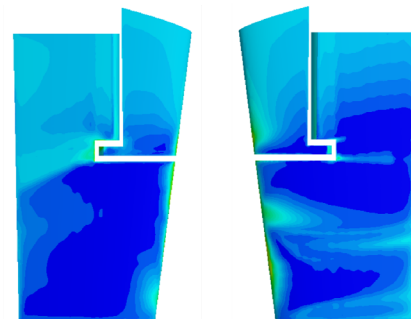


Fig. 11 Apparent wind speed U_A ($t = 90s$)



(a) Rear view at AP



(b) Starboard view(left) and Port view(right)

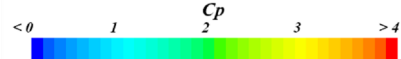


Fig. 12 Pressure distribution on rudder induced by asymmetric propeller flow ($t = 90s$, $\delta = 0^\circ$)

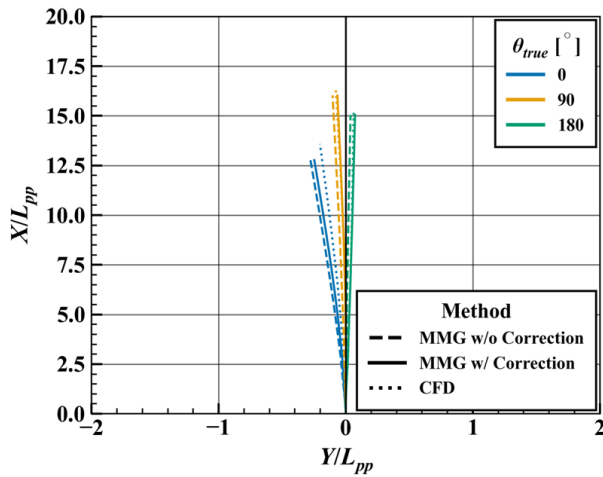


Fig. 13 Comparison of trajectory in 3DoF simulation

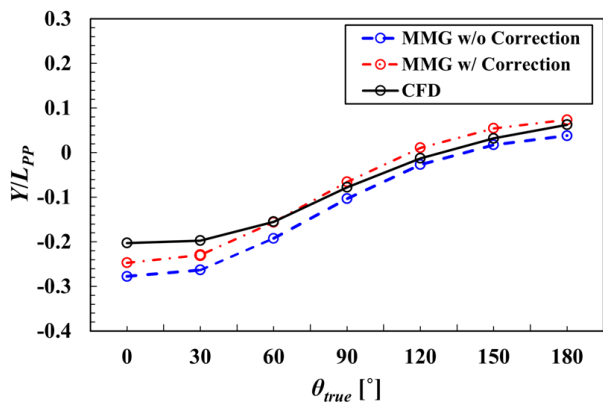


Fig. 14 Cross track error of trajectory in 3DoF simulation

산정하여 MMG 모델의 유효 유입각을 결정하였다.

$$\alpha_R = \sin^{-1} \left[\frac{-\overline{N_R}}{\frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_\alpha (x_R + a_H x_H)} \right] \quad (10)$$

여기서 A_R 은 방향타의 면적, U_R 은 타에 유입되는 축방향 속도 성분, f_α 는 타 양력 구배 계수, x_R 은 타의 종방향 위치, a_H 는 타력 증가 계수, x_H 는 선체 추가 횡력의 실제 작용 위치를 나타낸다.

Fig. 13는 CFD와 MMG 모델 해석 방법별로 로터세일 선박의 직진 안정성을 확인하기 위해 $\theta_{true} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 조건에서 유효유입각 보정 전과 보정 후 궤적을 비교한 그래프이다. 그래프에서 원점은 1자유도 해석의 마지막 시점을 기준으로 하였다. 모든 풍향에서 로터세일의 외력으로 발생하는 모멘트로 인해 로터세일 선박의 표류각이 발생하고, 이를 상쇄하기 위해 방향타 제어를 실시한 결과, 선수각은 0° 로 수렴하였으나, 선박은 원래의 직진 선로로 복귀하지 못하고 횡방향으로 이탈한 상태에서 전진하였다. 즉, 본 결과는 선박이 선수각을 유지한 채 일정한 crab angle을 가지고 항주하는 상태임을 의미한다. $\theta_{true} = 0^\circ$ 의 경우, 로터세일이 반시계 방향으로 회전할 때 양력이 좌현 방향으로 작용하므로 $-y$ 방향으로 치우치는 것을 확인할

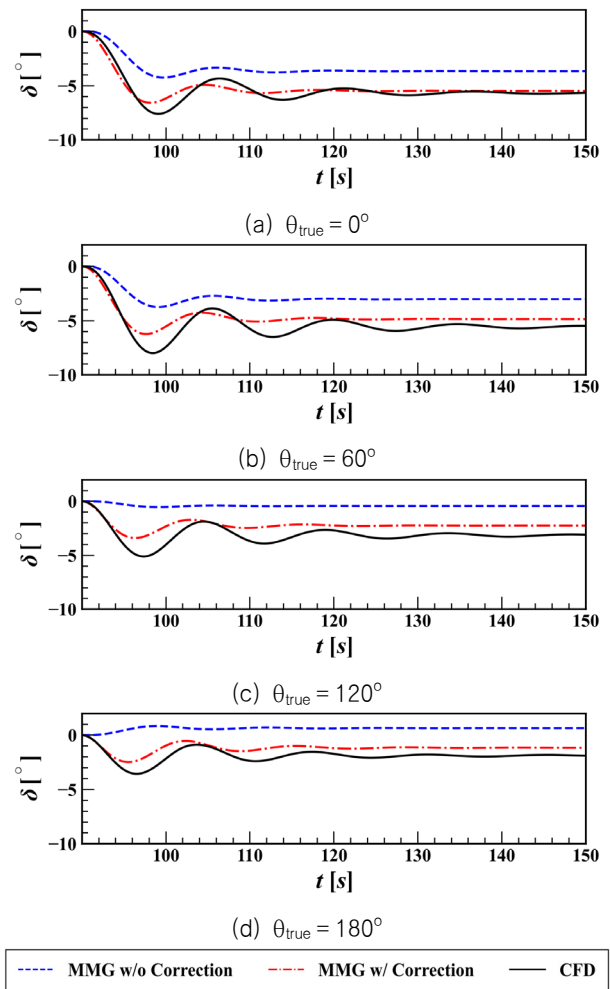


Fig. 15 Comparison of rudder angle in time domain

수 있고, 반대로 $\theta_{true} = 180^\circ$ 의 경우에는 $+y$ 방향으로 치우치는 것을 확인할 수 있다. 유효유입각이 보정된 MMG 모델의 궤적(실선)이 보정 이전 MMG 모델(굵은 파선)보다 CFD 결과 점선)에 근접한 것을 알 수 있다.

이를 정량적으로 비교하기 위해 3자유도 시뮬레이션의 계산 완료 시점에서 횡방향 편차(cross track error)를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 유효 유입각 보정 전후 CFD 결과와 횡방향 편차 최대 차이값은 $\theta_{true} = 0^\circ$ 에서 각각 약 0.07 LPP와 0.04 LPP로 나타났으며, 유효유입각 보정 후 CFD 해석 결과에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 θ_{true} 에 대한 타각의 시계열을 비교한 그래프이다. 1자유도 해석에 이어 3자유도 해석을 진행하며 로터세일의 외력으로 인한 표류각을 상쇄하기 위해 $\psi_{target} = 0^\circ$ 를 제어입력으로 하여 방향타를 제어를 시작하였으며, 모두 동일 PI 제어계수를 적용하였다. 계산 시작 후 10s 이내 오버슈트가 발생한 뒤 선수각이 수렴함에 따라 타각도 함께 수렴하는 경향을 보였다.

α_R 보정 전에는 3자유도 계산 초기에 프로펠러 비대칭 후류로 인한 유효유입각이 반영되지 않아 중립 타각을 과소 예측하였다. 반면 방향타에 작용하는 모멘트로 α_R 를 역산 및 보정한 후에는

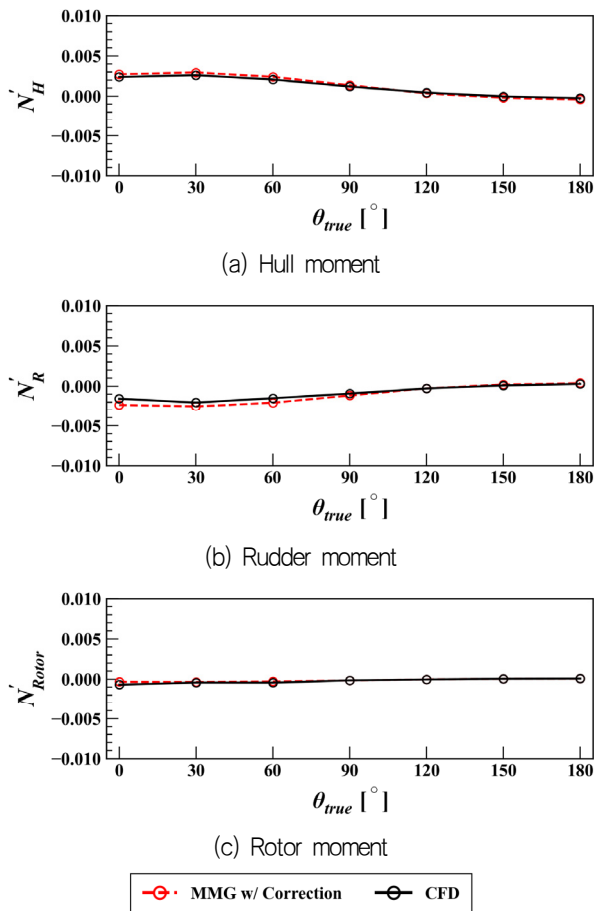


Fig. 16 Comparison of nondimensionalized yaw-moment components ($t = 150s$)

CFD와의 일치도가 개선되었고 최대 차이율은 약 40%에서 19%로 감소하였다.

Fig. 16는 3자유도 계산 종료 시점에서 α_R 이 보정된 MMG 모델과 CFD 결과의 선체 모멘트(N_H), 방향타 모멘트(N_R), 로터세일 모멘트(N_{Rotor})를 무차원하여 비교한 그래프이다. 전반적으로 CFD 해석과 MMG 모델의 모멘트는 서로 잘 일치하는 경향을 보였다. 다만 Fig. 15의 결과를 보면, MMG 모델의 중립 타각이 CFD 해석 결과보다 작게 예측됐지만 타 모멘트는 CFD 결과보다 근소하게 크게 예측되었다. 이러한 차이는 MMG 모델에 적용된 방향타 관련 계수가 CFD가 아닌 모형시험을 통해 도출되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 확인된 차이는 크지 않지만, 추후 선하나 지그재그 시험과 같이 대각도 타각이 요구되는 조건에서 방향타로 인한 모멘트를 추가적으로 비교 및 검증할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 로터세일로 인한 외력 모델을 3자유도 MMG모델에 적용하고, 이를 CFD 해석 결과와 비교하여 로터세일 선박의 직진성능과 중립타각을 분석하였다. 전진방향 1자유도 해석으로 직진 수렴 선속을 비교 및 검증하였고, 이어서 수평면 3자유도 해

석을 통해 선수각 제어 조건에서 선박의 궤적과 중립타각을 비교하였다. 갑판 경계층에 따른 로터세일 하단부의 유입 풍속 감소를 반영한 로지스틱 회귀 기반 유입풍 모델을 적용함으로써, 균일풍 모델 대비 선속 추정 정확도가 향상되었다. 또한 프로펠러 비대칭 후류로 인한 방향타 모멘트의 유효유입각을 역산하여 MMG 모델에 보정한 결과, 중립타각의 최대 차이율이 약 40%에서 19%로 감소하였다. 본 연구에서 제안한 MMG 모델은 계산 효율성과 정확도 측면에서 CFD를 이용한 상세 해석에 앞선 사전 검토 도구로의 실용성이 있다고 판단된다.

다만, CFD 해석에 적용된 가상 디스크 모델은 슬립스트림 내 선회류를 시간 평균적으로 재현하나, 비정상(unsteady) 압력 진동 및 날개 끝 와류는 묘사되지 않으며, 이로 인해 중립타각의 정량적 예측에 일정 수준의 오차가 수반될 수 있다. 향후 연구로는 프로펠러 형상을 직접 모델링한 해석과 가상 디스크 모델의 비교 검증과 함께, 로터-로터 상호작용을 고려한 모델 확장 및 선회 및 지그재그 시험을 통한 조종성능 평가가 요구된다. 또한 실제 운항 조건에서 로터세일은 횡력 및 선수동요 모멘트와 함께 횡동요 모멘트를 동시에 유발하며, 횡경사가 발생할 경우 로터세일의 유효 투영 면적과 유입풍 각도가 변화하여 공력 하중 및 중립 타각 산출에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 횡동요 운동을 포함한 4자유도 이상의 해석으로 고도화하고, 횡경사 조건에서의 공력 특성 변화가 중립 타각에 미치는 영향을 정량적으로 검토할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국산업 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-KI002688, 2026년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- Copuroglu, H.I. and Pesman, E., 2018. Analysis of Flettner rotor ships in beam waves. *Ocean Engineering*, 150, pp.352–362.
- De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G. and De Luca, F., 2016. Flettner rotor concept for marine applications: A systematic study. *International Journal of Rotating Machinery*, p.3458750.
- Garenaux, M., Schot, J.J.A. and Eggers, R., 2020. Numerical analysis of Flettner rotors performances on the MARIN Hybrid Transition Coaster. *12th Symposium on High-Performance Marine Vehicles*, Cortona, Italy, 12–14 October 2020, pp.297–313.
- Goldstein, S., 1929. On the vortex theory of screw propellers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 123(792), pp.440–465.
- Guzelbulut, C., Badalotti, T. and Suzuki, K., 2024. Optimization

- techniques for the design of crescent-shaped hard sails for wind-assisted ship propulsion. *Ocean Engineering*, 312, p.119142.
- Hough, G.R. and Ordway, D.E., 1964. The generalized actuator disk. *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, 2, pp.317–336.
- Hwang, E., 2024. *Study on prediction of aerodynamic coefficient of rotor sail using numerical analysis*. M.S. Daejeon: Chungnam National University.
- ITTC, 2017. *Uncertainty analysis in CFD—Examples for resistance and flow*. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–03–02–01.
- ITTC, 2024. *Guideline on Use of RANS Tools for Manoeuvring Prediction*. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5–03–04–01, Rev. 03.
- Kim, D., Song, S. and Tezdogan, T., 2021. Free running CFD simulations to investigate ship manoeuvrability in waves. *Ocean Engineering*, 236, p.109567.
- Kim, D.J., Yun, K., Park, J.Y., Yeo, D.J. and Kim, Y.G., 2019. Experimental investigation on turning characteristics of KVLCC2 tanker in regular waves. *Ocean Engineering*, 175, pp.197–206.
- Kwon, C.S., Yeon, S.M., Kim, Y.G., Kim, Y.H. and Kang, H.J., 2022. A parametric study for a Flettner rotor in standalone condition using CFD. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, p.100493.
- Lee, S.H. and Yang, K.K., 2025. Numerical comparison of two rudder configurations for underwater vehicle maneuverability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(6), pp.363–372.
- Park, J.Y., Seo, J.H. and Park, D.W., 2024. Numerical study on the aerodynamic performance of asymmetric vertical folding rotor sail, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(2), pp.68–76.
- Sauder, T. and Alterskjaer, S.A., 2022. Hydrodynamic testing of wind-assisted cargo ships using a cyber-physical method. *Ocean Engineering*, 243, p.110206.
- Tillig, F. and Ringsberg, J.W., 2020. Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships. *Ocean Engineering*, 211, p.107603.
- Wang, J. and Wan, D., 2018. CFD investigations of ship maneuvering in waves using naoe-FOAM-SJTU solver. *Journal of Marine Science and Application*, 17(3), pp.443–458.
- Woo, J. and Song, G., 2025. Comparison of aerodynamic performance based on the geometric variation in rotor sails, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 62(4), pp.261–270.
- Yasukawa, H. and Yoshimura, Y., 2015. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), pp.37–52.

Authorship Contribution Statement

Byung-Jin Byun: Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Kyung-Kyu Yang:** Conceptualization, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

