



비대칭 수직 접이식 로터세일의 성능 평가에 관한 수치해석 연구

박정윤¹ · 서장훈¹ · 박동우^{2,†}
동명대학교 조선해양시뮬레이션센터¹
동명대학교 해양모빌리티학과²

Numerical Study on the Aerodynamic Performance of Asymmetric Vertical Folding Rotor Sail

Jung Yoon Park¹ · Janghoon Seo¹ · Dong-Woo Park^{2,†}
Shipbuilding & Marine Simulation Center, Tongmyong University¹
Department of Marine Mobility, Tongmyong 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 rotor sail is one of the representative devices in eco-friendly wind-assisted propulsion systems that have been practically applied to commercial ships. The present study proposes an asymmetric vertical folding rotor sail (AFRS) designed for small ships, featuring asymmetric geometry along the vertical direction and the function of vertical folding. To evaluate the aerodynamic performance of rotor sail, the drag, lift and lift-to-drag ratio were derived using computational fluid dynamics. The aerodynamic performance of AFRS was compared with that of normal rotor sail with different aspect ratios and spin ratios. The effect of geometric parameters on the aerodynamic performance of AFRS was assessed by varying the asymmetric diameter ratio. The maximum improvement in lift-to-drag ratio for AFRS was approximately 12% in the considered case. Additionally, the resistance is decreased when AFRS is vertically folded without rotating. Throughout the present study, improved aerodynamic and resistance performances for AFRS were confirmed, which will successfully provide additional propulsion to small ships.

Keywords : Asymmetric vertical folding rotor sail(비대칭 수직 접이식 로터세일), Magnus effect(매그너스 효과), Lift-to-drag ratio(양항비), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

전 세계적으로 기후변화에 의한 문제가 심각해지면서 정부와 국제기구는 매년 환경규제를 강화하고 있다. 이에 조선 및 해운 업계는 선박에서 배출되는 온실가스를 줄이고 친환경적인 미래를 위한 해결책을 모색하고 있다 (Vilanova et al., 2023).

선박의 이산화탄소 배출을 저감하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 연료 전지, 암모니아, 메탄올과 같은 대체 연료의 사용이며, 두 번째는 풍력 보조 추진시스템(Wind Assisted Propulsion System, WAPS)으로써 바람을 이용하여 보조 추력을 얻게 되고 이를 통해 선박의 연료 소비를 감소시키는 방법이다 (Czermanski et al., 2022). 다양한 풍력 보조 추진시스템 중 매그너스 효과(magnus effect)를 이용한 로터세일(rotor

sail)은 대형 선박에 설치되어 성능 및 효과가 검증되어 있으며 (Schmidt, 2013), 이에 관한 여러 연구가 진행되고 있다.

De Marco et al. (2016)은 선박의 보조 추진 장치로써 로터세일의 초기 설계를 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 통한 공역학적 성능(aerodynamic performance)을 평가하였으며, 로터세일 설계 파라미터인 속도 비(Spin Ratio, SR), 종횡비(Aspect Ratio, AR), 끝단 플레이트(End Plate, EP)와 직경 사이의 비율인 D_e/D 의 변화에 따른 로터세일 성능 차이를 평가하였다. Kwon et al. (2022)는 로터세일의 설계 파라미터 변화와 해석 기법의 차이에 따른 성능을 예측하였다. CFD 해석을 위한 조건을 설정하기 위해 풍동 실험 결과가 공개된 로터세일 모델을 적용하였으며, 축적 효과에 따른 무차원 벽면 거리 y^+ 값의 영향을 검토하였다. Lv et al. (2022)는 반잠

수직 선박에 설치되는 로터세일의 수치해석을 수행하였으며, 갑판 위에 설치된 두 개의 로터세일 간의 거리와 회전속도 및 바람의 방향에 따른 성능을 분석하였다. Kim et al. (2022)는 단독 로터세일에 대한 난류 유동 특성의 영향을 평가하였으며, 다수의 로터세일에 대한 성능 및 상호 영향에 대한 성능을 평가하여 연구를 확장하였다 (Kim et al., 2023).

CFD를 이용한 로터세일의 성능 평가 외에 모형실험을 이용한 로터세일의 성능 평가도 선행 연구로 수행된 바 있다. Badalamenti et al. (2008)은 회전하는 원형 실린더에 대한 공역학적 계수가 EP에 미치는 영향에 대해 실험 연구를 수행하였으며, EP는 양력을 향상시키고 양항비를 개선할 수 있음을 확인하였다. Kume et al. (2022)는 CFD 계산 및 풍동 실험 결과의 비교를 통해 CFD 분석의 정확성을 평가하였다. 또한 높은 레이놀즈 수에서 수행된 CFD 계산이 모형 크기의 풍동 실험 결과와 일치함을 확인한 바 있다. Chen et al. (2023)은 대규모 크기의 로터세일에 대한 공역학적 성능을 실험적으로 평가하였으며, 다양한 풍향 각도 및 두 개의 로터세일이 있는 경우 간격 비율에 따른 공역학적 상호작용의 효과를 자세히 연구하였다. Bordogna et al. (2020)은 임계 및 초임계 레이놀즈 수에서 풍동 실험을 하였으며, 높은 속도비에서는 레이놀즈 수 변화에 따른 양력 계수의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

이와 같이 CFD와 실험을 이용한 로터세일의 해석 기법 및 성능을 평가하는 다양한 선행 연구가 진행되어왔으나, 대부분 일반 로터세일 형상만을 고려하였으며, 로터세일 형상 변화에 따른 성능 평가에 대한 선행 연구는 부족한 실정이다.

또한 로터세일에 대한 대부분의 선행 연구는 중대형 선박을 대상으로 수행되었으며, 소형 선박의 특성을 고려한 선행 연구는 부족하다. 소형 선박에 로터세일을 적용한 사례가 있으나, 다른 추진 방법보다 효율이 낮아 주 추진기관으로써는 상용화되지 못하였다 (Nuttal et al., 2016). 그리고 소형 선박의 경우 대형 선박에 비해 갑판 위에서 작업자의 이동이 잦으며, 크레인 등의 작업이 빈번하게 발생하기 때문에 로터세일을 사용하지 않을 시, 간섭을 최소화하는 방법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 소형 선박의 운용에 적합한 로터세일의 형상을 제안하고자 한다. 작업의 간섭을 최소화하기 위해 수직 접이 기능을 갖추고, 보조 추진 장치로서 성능을 향상시키기 위해 일반 로터세일 보다 높은 양항비를 가지는 로터세일의 형상을 고려한다. 양항비 향상을 위해 로터세일의 높이 차이에 따른 직경의 변화를 준 비대칭 수직 접이식 로터세일을 적용한다. 로터세일의 성능 확인을 위해 CFD를 이용한 성능 평가를 수행하며, 설계 변수의 변화에 따른 최적의 형상을 확인한다.

2. 로터세일 형상 및 수치 기법

2.1 로터세일 형상

본 논문에서 제안하는 소형 선박용 로터세일의 형상은 비대칭

수직 접이식 로터세일(Asymmetric vertical Folding Rotor Sail, AFRS)로서 하부에서부터 상부로 올라감에 따라 직경이 감소하는 형상이다. 이는 선행 연구에서 비대칭 직경을 가지는 실린더에 대한 실험 및 해석을 통한 초기 선행 연구가 수행되어 가능성을 확인한 바 있다 (Zhao et al., 2014; Tanasheva et al., 2020).

원형 실린더 형상의 기존 로터세일(Normal Rotor Sail, NRS)과 형상 비교를 위해 Fig. 1에 AFRS의 개념도를 나타냈다. 최소 직경(D_{Min})과 최대 직경(D_{Max})는 소형 선박 및 설계 조건에 따라 변화할 수 있으며, 평균 직경(D), 높이(H)와 EP의 직경(D_e)은 NRS와 같게 설정하였다. 로터세일의 크기는 기존 상용화된 로터세일과 본 연구에서 고려한 선박의 제원을 바탕으로 약 13m급 소형 선박에 적합하도록 설정하였다. 이에 따른 NRS와 AFRS의 주요 제원을 Table 1에 나타냈다. NRS와 AFRS의 D 와 D_e 는 고정하였으며, H 변화에 따른 AR을 변경하였다. AFRS의 최소 직경과 최대 직경의 감소 및 증가 비율은 일정하며 DR로 정의하였다. 예를 들어, D 를 기준으로 D_{Max} 와 D_{Min} 의 증감비율이 각각 10%인

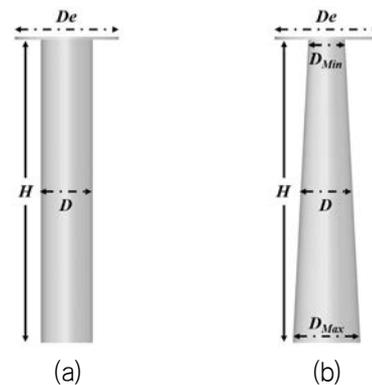


Fig. 1 Comparison of the shape between (a) NRS and (b) AFRS

Table 1 Main parameters of NRS and AFRS

AR	H(m)	D(m)	D_e (m)
2	1.0	0.5	1.0
4	2.0		
6	3.0		

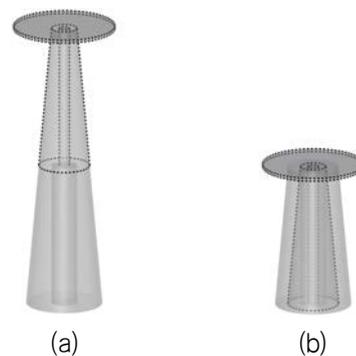


Fig. 2 Perspective view of (a) internal structure of AFRS and (b) folded AFRS

경우, 비율의 총합이 20%임에 따라 DR=2이며, 해당 AFRS 모델은 AFRS-2로 정의하였다. 내부 지지 구조와 단의 구성에 따라 AFRS는 다양한 높이로 접이가 가능하며, 본 연구에서는 2단으로 구성된 로터세일로 50%의 높이 감소를 고려하였다. AFRS의 내부 형상과 미운용에 따른 접이 시 형상을 Fig. 2에 나타냈다. 로터세일 상단과 하단의 서로 다른 직경을 가진 지지대가 로터세일 내부에 위치하며, Fig. 2(a)의 점선으로 표시된 상부단이 하부단 내부로 삽입되는 구조이다. 각 단의 끝은 내부 회전 기둥과 지지대로 연결되어 있어 로터세일의 회전을 가능하게 한다.

2.2 해석 기법

개발된 로터세일 형상에 대한 공역학적 성능을 평가하기 위해 상용 CFD 해석 소프트웨어 STAR-CCM+ Ver 16.06을 사용하였다. 로터세일 주위의 유동을 모사하기 위해 비압축성 유체의 비정상 3차원 점성 유동을 가정하였으며, 수치해석을 위한 지배 방정식은 연속방정식과 난류 유동의 구현을 위한 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 고려하였다. 연속 방정식 및 RANS 방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \tag{2}$$

여기서, u_i 는 x_i 의 좌표계에 따른 속도 성분이며, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 와 μ 는 각각 압력, 유체의 점성 계수이다. 또한 식 (2)의 레이놀즈 응력(Reynolds stress) 항은 기존 연구에서 적용한 $k-\omega$ SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다 (De Marco et al., 2016; Kim et al., 2022). 지배방정식의 시간항에 대해서는 1차 정확도인 Euler 차분 기법이 적용되었으며, 공간에 대한 이산화는 2차 상류 기법(Second Order Upwind scheme, SOU)가 사용되었다. 속도-압력 상호 연계는 반복적인 계산을 수행하는 SIMPLE(Semi-implicit Method for Pressure-linked Equation) 알고리즘 기법을 기반으로 계산되었다 (Siemens, 2021).

본 논문에서 사용한 계산 영역 및 경계 조건을 Fig. 3에 나타냈다. De Marco et al. (2016)과 Kim et al. (2022)의 기존 연구를 바탕으로 로터세일의 회전을 모사하기 위해 중첩 격자(overset mesh) 기법을 사용하였다. 로터세일 근처의 원통 영역과 이를 제외한 외부 영역을 각각 회전 영역(rotational region) 및 비회전 영역(stationary region)으로 설정하였으며 이를 Fig. 3(c)에 나타냈다. 두 영역 사이는 보간(interpolation) 기법을 통해 물리량을 상호교환한다. 계산 영역의 크기는 De Marco et al. (2016)의 선행 연구에서 적용한 크기를 참고하였으며, 자유 유동 방향으로 $-27.5 < x/D < 5.0$, 자유 유동 방향에 수직인 방향으

로 $-7.5 < y/D < 7.5$, 로터세일의 높이 방향으로는 $0 < z/H < 3.5$ 로 설정하였다. 입구에는 균일류 경계 조건을 부여하였으며, 출구는 대류 경계 조건을 적용하였다. 로터세일 표면에는 점착 경계 조건을, 이를 제외한 나머지 영역은 대칭 경계 조건을 사용하였다. 로터세일의 회전 방향은 Fig. 3(b)의 평면에서 반시계 방향으로 선정하였다. 해석에 사용된 로터세일 표면 및 바닥 경계면의 격자를 Fig. 4에 나타냈다. 로터세일 표면의 유동을 정확히 예측하기 위해 y^+ 는 약 1로 설정하였으며, 로터세일의 형상을 따라 5개의 프리즘 층(prism layer)을 구성하고 이때 프리즘 층의 총 두께(prism layer thickness)는 0.017m로 하였다.

본 논문에서 제시하는 AFRS는 접이가 가능하여 대형 선박에 비해 상대적으로 속도가 빠른 소형 선박에 적합하므로, AFRS의 성능 검증을 위해 높은 SR에서도 해석을 수행하였다. SR의 범위는 1에서 5까지 1 간격으로 고려하였으며, AFRS의 SR에 대한 정의는 NRS와 직경이 동일한 0.5H에서 설정되었다. SR의 정의는 식 (3)과 같다 (Kwon et al., 2022).

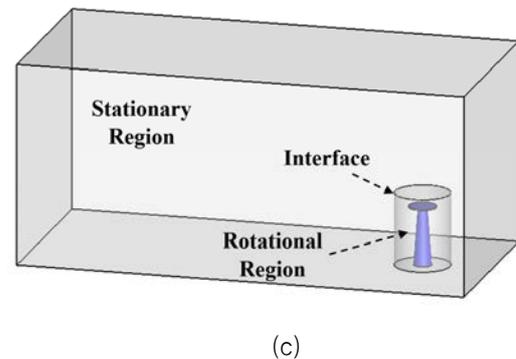
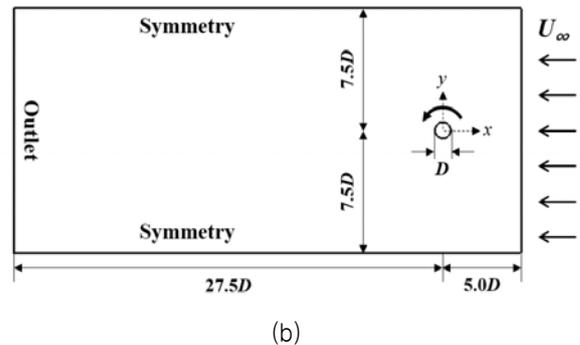
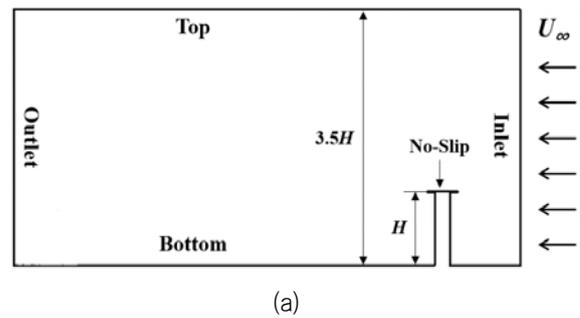


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions: (a) side view, (b) top view and (c) perspective view

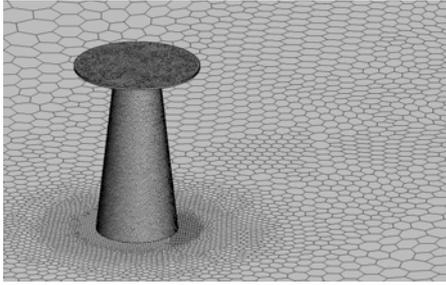


Fig. 4 Grid distribution on the surface of AFRS and bottom

$$SR = \frac{V_{rotor}}{U_{\infty}} = \frac{0.5D\omega}{U_{\infty}} \quad (3)$$

여기서 V_{rotor} 와 ω 는 각각 로터세일 표면에서의 접선속도 및 각속도이며, U_{∞} 는 자유 유동 방향의 속도이다.

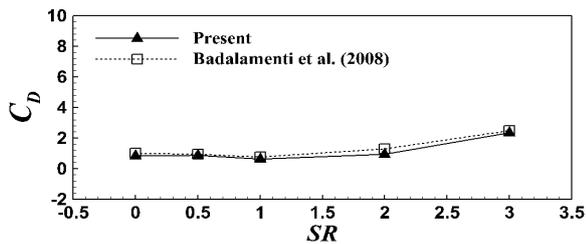
본 해석에서 고려된 SR의 범위에 따른 레이놀즈수의 범위는 3.192×10^5 에서 1.596×10^6 까지이며, 해석 시간 간격은 0.0001s로 설정하였다.

2.3 수치해석 방법의 검증

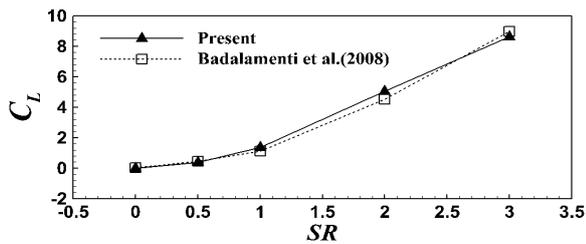
본 연구에서 사용한 해석 기법의 신뢰도 검증을 위해 선행 연구의 실험 결과와 비교하였다. 비교 변수로는 항력(C_D)과 양력(C_L)이며, 각각은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A} \quad (5)$$



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of C_D and C_L between present and experimental results

Table 2 Results of grid dependency test

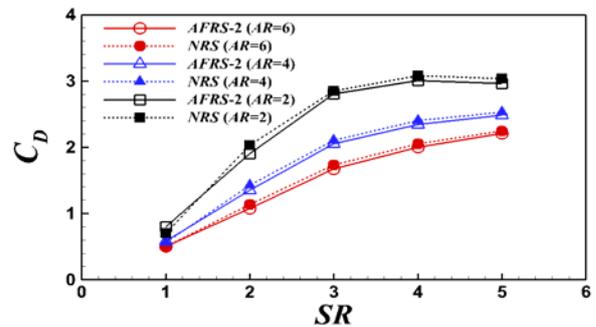
Grid	Number of grids	C_D	C_L	C_L/C_D
Coarse	1,228,547	2.137	7.135	3.339
Medium	4,354,785	2.157	7.223	3.349
Fine	6,226,213	2.164	7.250	3.350

여기서, F_D 는 항력, F_L 은 양력이며 A 는 자유 유동 방향을 기준으로 투영된 단면적이다. 기존 연구는 회전하는 원형 실린더에 대한 실험 연구로 본 논문에서 사용하고자 하는 수치 기법을 적용한 결과와 비교하여 Fig. 5에 나타냈다 (Badalamenti et al., 2008). 이때 실린더의 D , H 및 D_e 는 각각 88.9mm, 450mm, 177.8mm이며, 자유 유동속도는 7m/s로 고려되었다. 해석을 통해 선정된 항력과 양력 계수는 SR의 변화에 따른 차이를 보여주며, 실험 결과의 경향과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

격자수의 차이에 따른 해석 결과의 영향을 확인하기 위해 격자 의존성 평가를 수행하였으며, 격자 시스템에 따른 결과를 Table 2에 나타냈다. 격자계에 따른 항력과 양력 계수 및 양항비의 차이는 크지 않음을 확인하였으며, 이에 medium 격자계를 사용하였다.

3. 결과 및 검토

개발된 AFRS와 NRS의 공역학적 성능을 비교하였다. 로터 세일의 SR에 따른 주요 성능인 C_D , C_L 과 C_L/C_D 를 Fig. 6에 나타냈다. AR의 경우 2, 4와 6을 AFRS와 NRS에 적용하였으며, AFRS의 DR은 2(AFRS-2)로 선정하였으며, D_e/D 의 경우 2로 고정하였다. SR이 증가함에 따라서 C_D 는 증가하는 경향을 Fig. 6(a)에서 확인할 수 있다. C_L 의 경우 SR=3까지 증가하는 경향을 보이며, 이후 감소한다(Fig. 6(b)). C_L/C_D 의 경우 전반적으로 감소하는 경향을 보이나, 낮은 SR 구간에서는 일부 조건에서 증가하는 경향을 나타낸다(AR=2, 6). 동일한 SR 조건에서 AR이 증가함에 따라 C_D 는 감소하며, C_L 는 증가한다. 이에 따라서 C_L/C_D 는 증가하여 더 좋은 성능을 보여준다. AR이 낮은 경우 AFRS-2와 NRS의 C_L/C_D 차이가 크지 않으며, SR=1에서는 NRS가 더 높은 C_L/C_D 를 보인다(Fig. 6(c)).



(a)

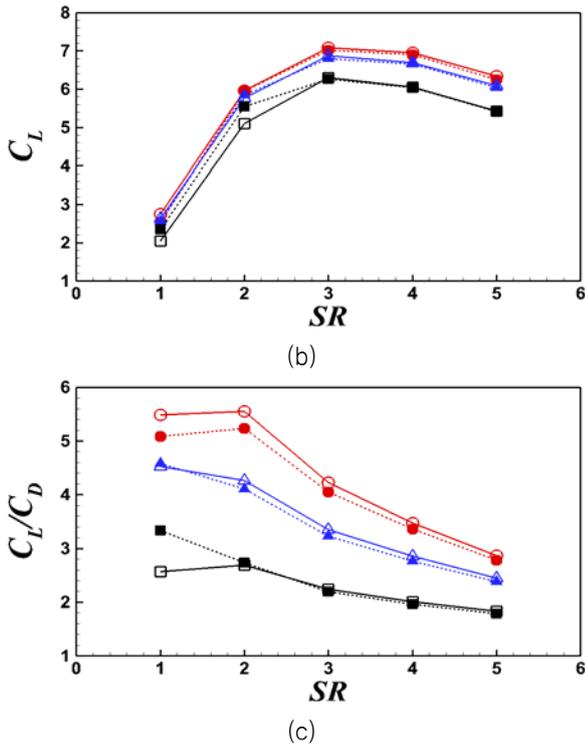


Fig. 6 Results of NRS and AFRS-2: (a) C_D (b) C_L and (c) C_L/C_D

그러나 AR이 증가함에 따라서 AFRS-2의 C_L/C_D 가 NRS에 비해 더 큰 값을 가지게 되며, 낮은 SR 조건에서는 그 차이가 두드러짐을 확인할 수 있다. 결과적으로 AR=6인 경우 AFRS-2와 NRS의 C_L/C_D 차이는 SR=1, 3과 5 조건에서 약 7.8%, 4.5%, 3.2%를 각각 나타낸다.

AFRS-2와 NRS의 공역학적 계수의 차이를 확인하기 위해 로터세일의 높이별 단면에서의 표면 압력 계수(C_p) 분포를 Fig. 7에 비교하였다. 압력 계수의 정의는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (6)$$

Fig. 7에서 실선은 AFRS-2를, 점선은 NRS를 나타낸다. 표면 각도는 0° 가 입구 경계 조건 방향이며, 180° 는 출구 경계 조건 방향으로 반시계 방향으로 증가한다. 가장 낮은 높이인 $z/H=0.17$ 에서 낮은 SR 조건에 90° 위치의 C_p 는 AFRS-2가 더 작은 값을 가지며, 이는 높이가 증가함에 따라서 차이가 감소한다. 반면 높이와 관계없이 0° 와 180° 부근에서의 C_p 는 NRS가 더 큰 값을 보인다. 이러한 C_p 의 차이는 Fig. 6에서 보인 SR=1 조건에서 C_D 와 C_L 의 차이를 설명한다. 반면 SR=3과 5의 조건에서 C_p 의 차이는 SR=1에 비해 작으며, 높이에 따른 C_p 의 변화는 SR=1과 다른 경향을 나타낸다. $z/H=0.17$ 에서 90° 위치의 C_p 는 NRS가 더 작은 값을 가지며, 단면 높이가 증가함에 따라 그 경향이 역전된다. 또한 SR=1에서 확인할 수 있었던 0° 와 180° 부근에서의 C_p 는 큰 차이를 보이지 않는다. 마찬가지로 이러한 C_p 의 차이는 Fig. 6에서 보이는 AFRS-2와 NRS의 C_L/C_D 차이를 설명한다.

로터세일 주위의 유동장 차이를 확인하기 위해 $z/H=0.17$ 과 0.83 에서의 단면 압력 분포를 Fig. 8에 나타냈다. 유체는 Fig. 8의 우측에서 좌측으로 흐르며, 로터세일은 반시계 방향으로 회전한다. SR=1의 조건에서 양의 압력 분포는 NRS가 AFRS-2보다 더 넓게 분포되어 있음을 Fig. 8(a)와 (c)를 통해 확인할 수 있다. 반대로 로터세일 부근의 음의 압력은 $z/H=0.17$ 에서는 AFRS-2가 NRS에 비해 더 크게 분포되어 있다. AFRS-2의 아래쪽 단면에서는 AFRS-2의 곡부 직경이 증가함에 따라 로터세일 회전에 의한 속도가 더 증가하며, 이에 따라 더 큰 양력을 가지게 된다. 반면 $z/H=0.83$ 에서 AFRS-2의 직경 감소로 인한 회전속도의 감소가 작아 양력의 감소가 크지 않은 것으로 판단된다. SR=5의 경우, AFRS-2와 NRS의 압력 계수 분포의 차이가 크지 않음을

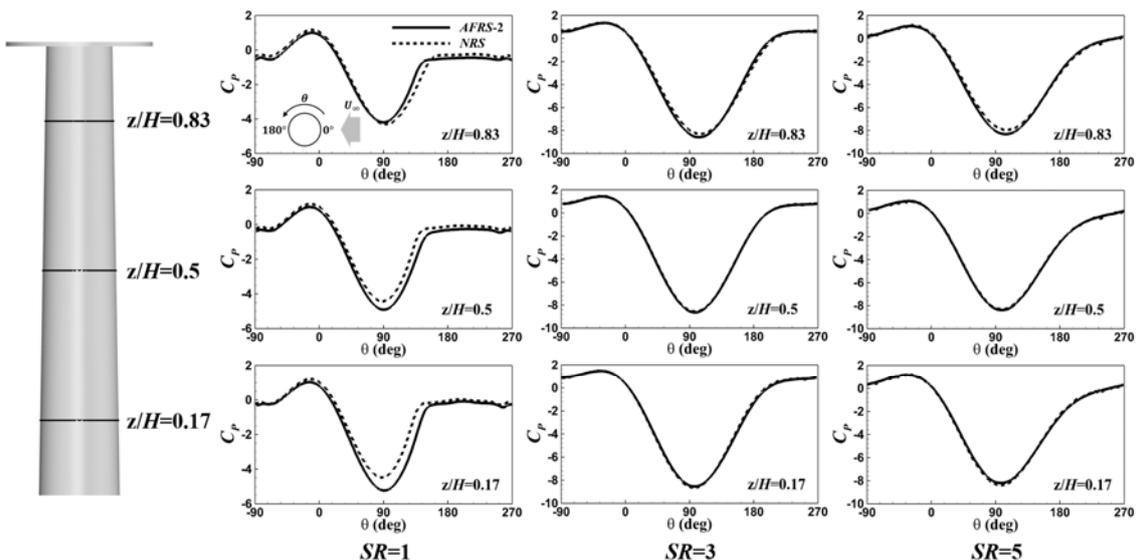


Fig. 7 Comparison of surface pressure coefficient along the circumferential direction for NRS and AFRS-2 with AR=6

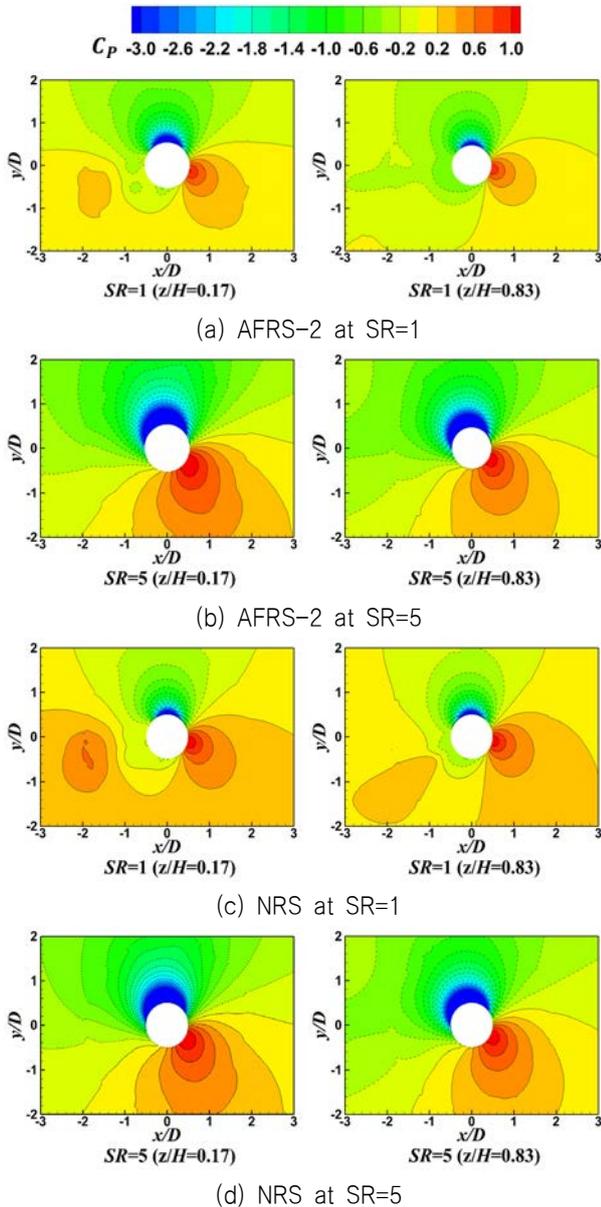


Fig. 8 Pressure distributions near AFRS and NRS

Fig. 8(b)와 (d)를 통해 확인할 수 있다. 또한 양의 압력 분포가 가장 큰 위치도 NRS와 유사하게 나타난다.

AFRS의 형상에 따른 성능 평가를 위해서 DR을 변경하며 공역학적 계수 및 유동장의 특성을 비교하였다. DR은 2(AFRS-2), 6(AFRS-6) 및 10(AFRS-10)으로 변화시켰으며, 그에 따른 형상은 Fig. 9에 나타났다.

AFRS의 형상 변화에 따른 공역학적 계수의 변화를 Fig. 10에 나타냈다. AR=2의 경우, SR에 관계없이 DR이 증가함에 따라 C_D 와 C_L 이 감소한다. C_D 와 C_L 의 감소를 차이로 인해 C_L/C_D 의 경우 낮은 SR에서는 AFRS-2가 가장 크나 높은 SR로 이동함에 따라 AFRS-6 및 AFRS-10과 동일한 경향으로 변한다. 또한 AR=2, DR=10(AFRS-10) 및 SR=5 조건에서 NRS 대비 12%의 가장 높은 양항비 향상을 보이며, AR=4, DR=10(AFRS-10) 및 SR=4 조건에서 NRS 대비 1.8%의 가장 낮은 양항비 향상이 나타나는 것

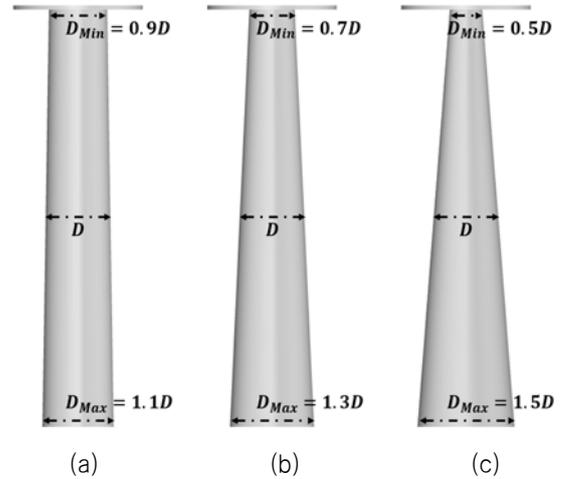


Fig. 9 Comparison of the AFRS shape according to DR: (a) AFRS-2 (b) AFRS-6 and (c) AFRS-10.

을 확인하였다. AR=4와 6의 경우, 낮은 SR에서 AFRS-10이 가장 큰 C_D 값을 가진다. C_L 의 경우 AR=2의 경향과 같이 DR이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 C_D 와 C_L 의 경향 변화로 인해 C_L/C_D 의 경우 높은 SR에서 점점 수렴하게 되며 큰 차이를 보이지 않는다. 결과적으로 AFRS-2와 AFRS-10의 C_L/C_D 차이는 SR=1과 5에서 각각 약 40%와 1%이다. 이는 낮은 SR에서는 DR이 작은 AFRS가 더 좋은 성능을 나타내며, 높은 SR에서는 DR에 관계없이 유사한 성능을 보임을 의미한다.

DR 변화에 따른 표면 압력 차이를 확인하기 위해 AR=6의 $z/H=0.17, 0.5, 0.83$ 에서 C_p 분포를 Fig. 11에 나타냈다. SR=1의 조건에서 90° 위치 근처에서 가장 낮은 C_p 를 보이는 조건은 $z/H=0.17$ 과 0.83 에서 각각 AFRS-10과 AFRS-2로 나타난다. SR=3에서는 높이와 관계없이 AFRS-2가 가장 낮은 C_p 를 가지며, 이러한 경향은 SR=5에서 역전되어 $z/H=0.17$ 과 $z/H=0.83$ 에서 각각 AFRS-2와 AFRS-10가 가장 낮은 C_p 를 가진다. 결과적으로 국부 직경의 차이에 따라서 AFRS 표면의 압력 변화를 일으키며, 이에 따라 C_D, C_L 및 C_L/C_D 의 변화가 발생함을 확인할 수 있다.

AFRS의 DR에 따른 유동장 변화를 Fig. 12에 나타냈다. SR=1과 5의 조건에서 AFRS-6과 AFRS-10을 비교하였으며, $z/H=0.17$ 과 0.83 의 AFRS 주변의 압력 분포 및 유선 변화를 확인하였다. SR=1의 조건에서는 AFRS의 앞쪽에서 발생하는 정체점(stagnation point) 부근의 양의 압력 분포가 AFRS-10이 더 크며, 이로 인해 더 큰 C_D 가 나타남을 판단할 수 있다. 또한 SR=1에서는 AFRS의 후류에 와(vortex)가 발생하는데, 와의 크기 및 위치는 큰 차이를 보이지 않는다. SR=5의 조건에서 압력 분포 및 유선은 DR의 변화에 따라 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

AFRS의 주요 특징인 접이식의 장점을 확인하기 위해서 미운용 시의 저항 성능을 확인하였다. Fig. 13에서 보이는 바와 같이 AFRS가 접혔을 경우와 NRS에 대해 회전속도를 고려하지 않고, 자유 유동에서의 저항값을 Table 3에 비교하였다. AFRS의 높이가 약 50% 감소함에 따라 전압 면적이 감소하게 되며, NRS에 비해 저항값은 약 48% 감소함을 확인할 수 있다.

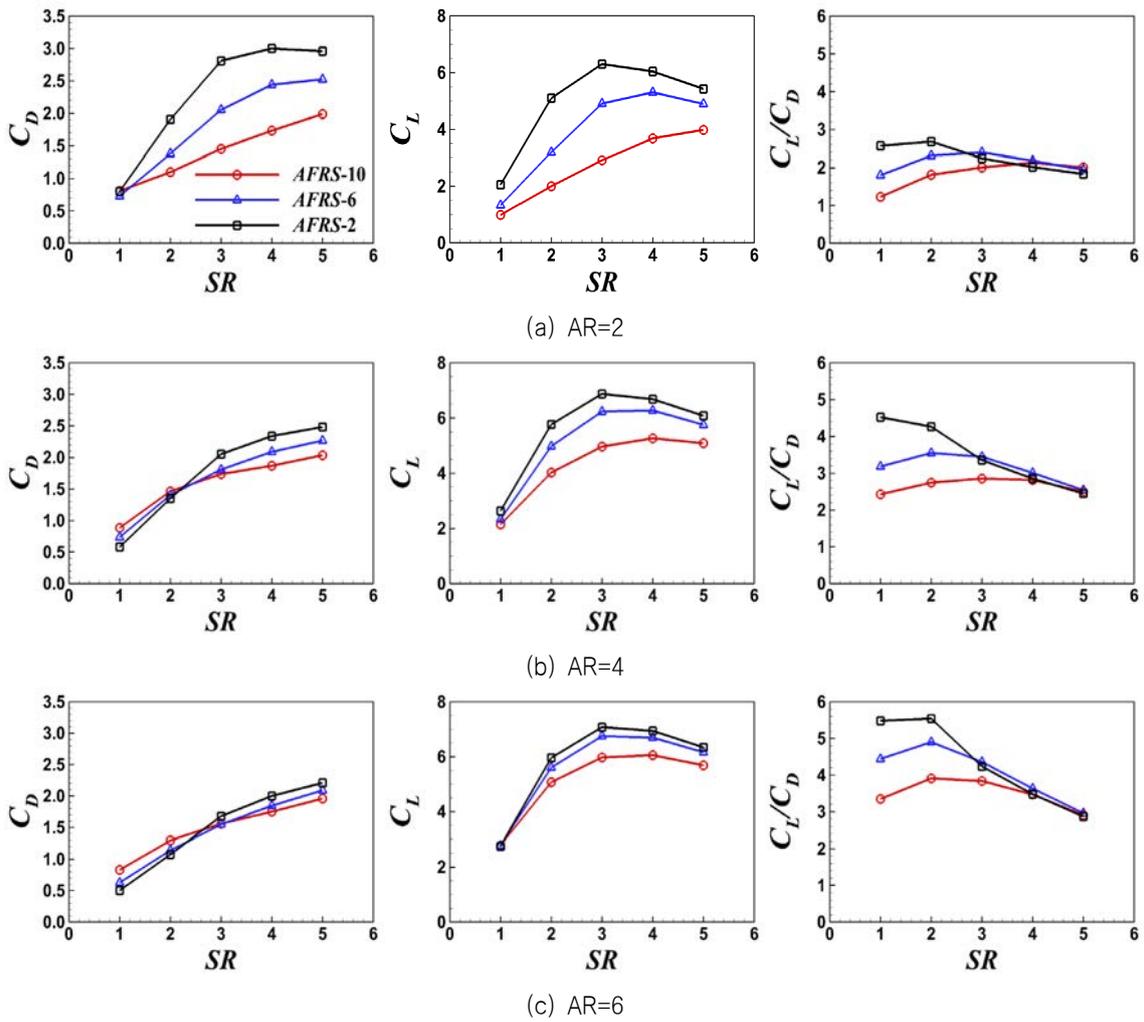


Fig. 10 Results of C_D , C_L and C_L/C_D with different DR of AFRS

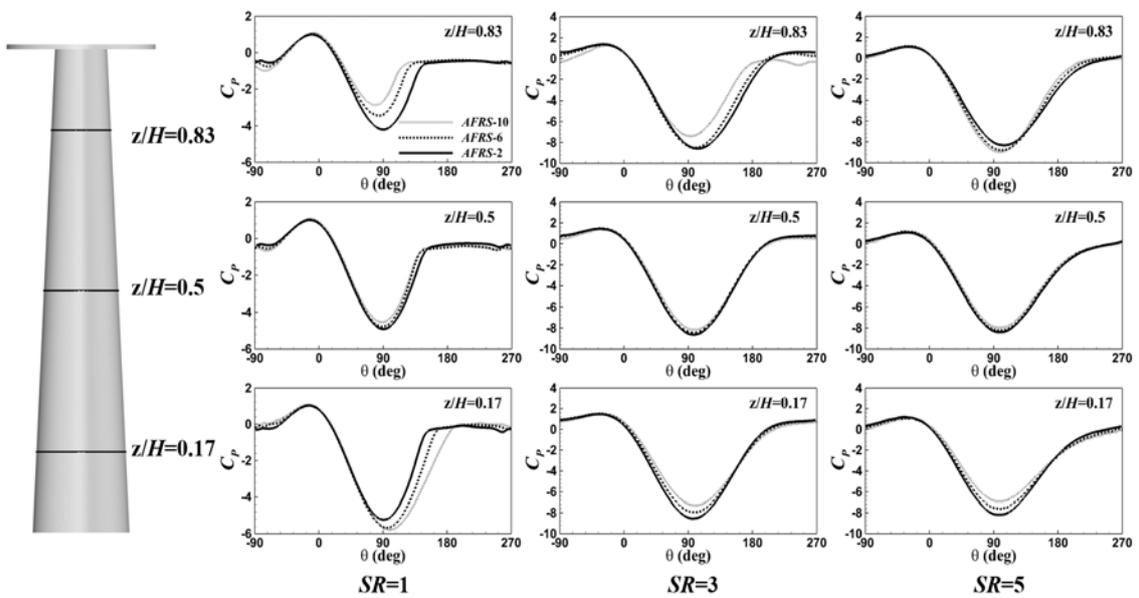


Fig. 11 Comparison of surface pressure coefficient along the circumferential direction for AFRS with different DR and AR=6

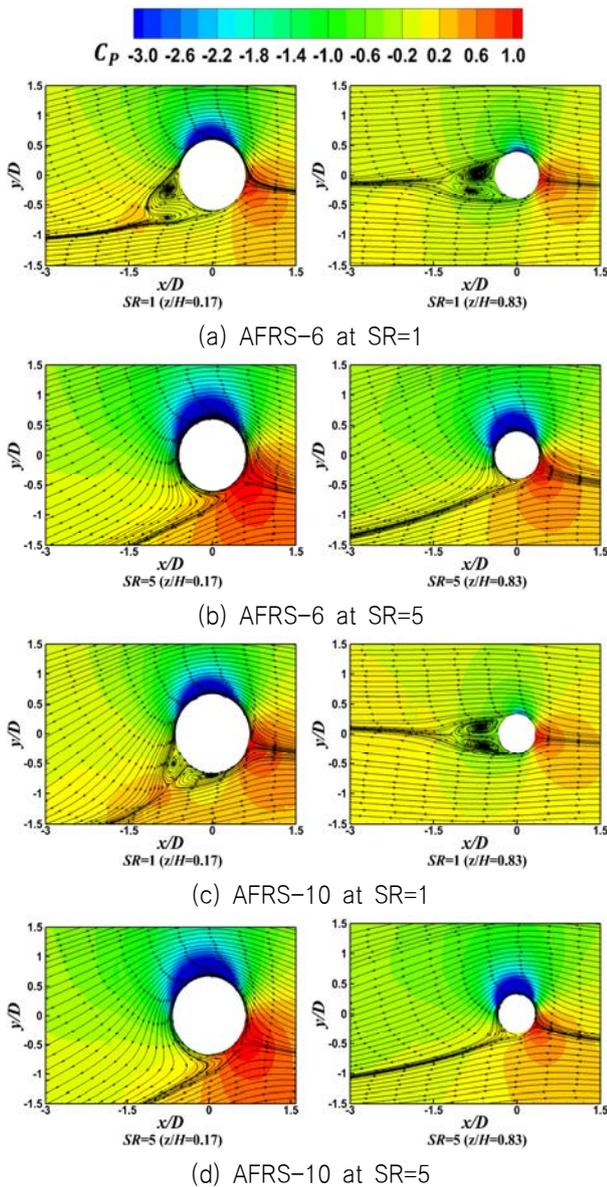


Fig. 12 Pressure distributions near AFRS

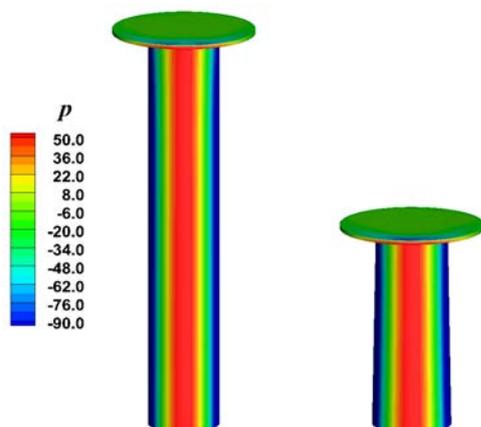


Fig. 13 Contours of pressures on the surface of (a) NRS and (b) folded AFRS

Table 3 Results of drag forces

Force	NRS	AFRS	Difference
Drag force (N)	29.421	15.409	-47.6%

4. 결론

본 연구에서는 소형 선박에 적합한 로터세일의 형상으로 비대칭 수직 접이식 로터세일을 제안하며, 해당 형상은 유체역학적 성능을 향상시키고자 로터세일 하부에서 상부로 올라감에 따라 직경이 감소한다. 일반 로터세일과 비대칭 수직 접이식 로터세일의 공역학적 성능을 전산유체역학을 통해 비교하였다. 항력, 양력, 양항비의 비교를 통해 비대칭 수직 접이식 로터세일의 성능을 확인하였다. 속도비에 따라 양항비의 성능은 NRS 대비 AR=2, DR=6 및 SR=4에서 최소 1.8%의 양항비 향상을 보였으며, AR=2, DR=2 및 SR=5 조건에서 최대 12%의 양항비 증가가 확인되었다. 그리고 비대칭 직경 변화에 따른 공역학적 성능 변화를 확인하였다. 미운용 시 접이 상태에서의 저항값은 일반 로터세일에 비해 약 48% 감소하였다. 본 연구를 통해 비대칭 수직 접이식 로터세일의 성능 향상을 확인하였으며, 향후 소형 선박에 실제 적용을 위해 개발된 로터세일의 배치 및 운용에 따른 성능 평가로 연구를 확장하고자 한다.

후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 스마트특성 화기반구축 사업 중 실물-가상연계 조선해양 기본설계 기술지원 사업(P0021213) 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Badalamenti, C. and Prince, S., 2008. Effects of endplates on a rotating cylinder in crossflow. *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Honolulu, Hawaii, 18–21 August 2008.
- Bordogna, G., Muggiasca, S., Giappino, S., Belloli, M., Keuning, J.A. and Huijsmans, R.H.M., 2020. The effects on the aerodynamic interaction on the performance of two flettner rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 196, 104024.
- Chen, W., Wang, H. and Liu, X., 2023. Experimental investigation of the aerodynamic performance of flettner rotors for marine applications. *Ocean Engineering*, 281, 115006.
- Czermanski, E., Oniszczyk-Jastrzabek, A., Spangenberg, E.F., Kozłowski, L., Adamowicz, M., Jankiewicz, J. and Cirella,

- G.T., 2022. Implementation of the energy efficiency existing ship index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy*, 145, 105259.
- 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*. 2016, 3458750, 12.
- Kim, J.E., Cho, D.H. and Lee, C.Y., 2022. Numerical analysis study on the turbulent flow characteristics around the rotor sail for vessels. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 28(4), pp.648–656.
- Kim, J.E., Cho, D.H. and Lee, C.Y., 2023. Numerical study on the effect of the arrangement type of rotor sail on lift formation. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 29(2), pp.197–206.
- Kume, K., Hamada, T., Kobayashi, H. and Yamanaka, S., 2022. Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD. *Ocean Engineering*, 254, 111345.
- Kwon, C.S., Yeon, S.M., Kim, Y.C., Kim, Y.G. and Kim, Y.H., 2022. A parametric study for a flettner rotor in standalone condition using CFD. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100493.
- Lv, J., Lin, Y., Zhang, R., Li, B. and Yang, H., 2022. Assisted propulsion device of a semi-submersible ship based on the magnus effect. *Polish Maritime Research*, 29(3), pp.33–46.
- Nuttall, P. and Kaitu'u, J., 2016. The magnus effect and the flettner rotor: potential application for future oceanic shipping. *The Journal of Pacific Studies*, 36(2), pp.161–182.
- Schmidt, A., 2013. E-Ship 1–A wind-hybrid commercial cargo ship. *12th Conference on Ship Efficiency*, Hamburg, Germany, 23–24 September 2013.
- Siemens STAR-CCM+ 2021.3 User Guide.
- Tanasheva, N.K., Chirkova, L.V., Dyusembaeva, A.N. and Sadenova, K.K., 2020. Aerodynamic characteristics of a rotating cylinder in the form of a truncated cone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93, pp.551–555.
- Vilanova, M.R., Bingham, H.B., Fluck, M., Morris, D. and Psarftis, H.N., 2023. Optimal deck position of rotor sails and dynarigs for a bulk carrier retrofit installation. *Sustainability in Ship Design and Operations Conference*, New York, New York, United States, 6–7 November 2023.
- Zhao, M., Mao, J. and Yang, G., 2014. Research on compressible flow around cylinder and truncated cone with LES method. *Advanced Materials Research*, 919, pp.210–215.

